

# **ANÁLISE COMPARATIVA DE POSTES DE TRANSMISSÃO EXECUTADOS EM AÇO MACIO E EM AÇO DE ALTA RESISTÊNCIA**

**JOÃO PEDRO PEREIRA DE SOUSA**

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de  
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS**

---

Orientador: Professor Doutor Rui Manuel de Menezes e Carneiro de  
Barros

---

Coorientador: Mestre Jorge Fernando Martins Henriques

JULHO DE 2014

## **MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2013/2014**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ [miec@fe.up.pt](mailto:miec@fe.up.pt)

*Editado por*

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ [feup@fe.up.pt](mailto:feup@fe.up.pt)

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2013/2014 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2014.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus exemplos de vida

*“Nada pode impedir a sua imagem de alcançar a forma concreta, exceto o mesmo poder  
que lhe deu vida – Você”*

*Genevieve Behrend*





## **AGRADECIMENTOS**

A realização desta dissertação foi acompanhada pela presença de várias amizades realizadas ao longo do meu percurso académico. A elas dedico uma especial atenção na medida em que me proporcionaram grandes emoções, experiências e companheirismo que tornaram a minha vida mais rica, feliz e alegre, mesmo nas horas de trabalho árduo e nos momentos mais difíceis.

Ao professor Doutor Rui Carneiro de Barros, orientador desta dissertação, pelos conhecimentos transmitidos, pelo apoio e pela receptividade constante.

Ao meu coorientador, Mestre Jorge Fernando Henriques, excepcional por todo o auxílio, incentivo e disponibilidade demonstrada.

À empresa Metalgalva – Grupo Metalcon, nomeadamente os profissionais do Departamento técnico e comercial que voluntariamente se disponibilizaram e cooperaram para contribuir no sucesso deste trabalho.

Gratifico também o vasto conjunto de docentes presentes desde a minha infância até à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, pelo sentido pedagógico, por todos os conhecimentos adquiridos e pelo engenheiro e pessoa que me tornei.

Por fim, um agradecimento muito forte à minha família pelo crédito, apoio, carinho e amor que sempre me dedicaram ao longo de toda a minha vida. Concedem-me o ensino e experiência diária que jamais alguma instituição poderá oferecer.



## RESUMO

O crescente progresso tecnológico tem permitido, ao longo das últimas décadas, o desenvolvimento de aços de construção com maior resistência e características comportamentais de melhor qualidade. Deste modo, o presente trabalho visa modelar e dimensionar um poste de transmissão com 46,5 metros de altura e 8 cabos condutores no topo, cujo fuste pode ter diferentes geometrias de secção transversal, diferentes diâmetros e diferentes classes de resistência de aço desde S235 a S690, para posteriormente se realizar uma comparação das vantagens económicas associadas ao seu processo de fabrico.

Com efeito, foi necessário desenvolver uma população de casos possíveis de dimensionamento, que verifiquem a segurança, a partir da qual se retira os parâmetros físicos que permitem obter as soluções menos dispendiosas. Para tal, foi desenvolvida uma aplicação informática com programação em *Visual Basic*, em ambiente *Excel*, que realiza o cálculo da ação do vento sobre a estrutura, dimensionamento e a verificação de segurança (de acordo com o método geral de verificação da encurvadura por flexão e encurvadura lateral) de forma automática e individual para cada caso. Através de um processo iterativo de dimensionamento obteve-se 296 soluções viáveis a partir das quais se efetuou a análise de custos de fabrico.

Dentro da análise de custos considerou-se alguns preços médios, fornecidos pela Metalgalva, como o preço do aço por tonelada conforme a sua classe, preço por quinagem, preço de soldaduras, preço de galvanização e preço da pintura final.

Com estes valores foi possível calcular o custo total associado a cada solução de modo a se obter os casos mais económicos para cada classe de aço.

Os resultados obtidos foram os esperados e indicam uma poupança monetária de 3,0%, 5,6%, 10,0%, 18,8% e 30,2% no custo de fabrico de um fuste executado em aço S690 em comparação com o aço S620, S550, S500, S450 e S355 respetivamente (os aços S235 e S275 não conseguiram garantir a segurança para as limitações geométricas impostas pela Metalgalva).

**PALAVRAS-CHAVE:** Postes de transmissão, aços de alta resistência, vento, método geral, custos



## ABSTRACT

The ever-evolving technological progress has allowed, over the past decades, the development of structural steels with higher strength and behavioral characteristics of better quality. Thus this study aims to model and design a transmission tower pole structure with 46.5 meters in high, able to support 8 conductor cables at the top. The pole shaft can have different cross-sectional geometries, different diameters and different strength classes of steel from the S235 to the S690, enabling to make a comparison of the economic benefits associated with the manufacturing process.

Indeed, it was necessary to develop a population of possible design cases that check the security, from which are derived the physical parameters, which allow obtaining less expensive solutions. To this end, a computer application with *Visual Basic* programming was developed that was included in an *Excel* worksheet environment, which performs the computation of the wind actions on the structure, designs and verifies the structural safety (in accordance with the general method of verifying flexural buckling and lateral buckling) automatically and individually for each transmission pole case. An iterative design process led to the development of 296 viable solutions, from which the analysis of manufacturing costs can be compared.

Within the cost analysis, some average costs or unit prices were considered, provided by Metalgalva, namely: the price of steel per ton according to its class, price for sheet folding or bending of plates, welding costs, galvanizing costs and final painting costs.

With these values it is possible to calculate the total cost associated with each solution so as to obtain the most economical cases for each steel grade.

The results obtained were as expected and indicate a monetary savings of 3.0%, 5.6%, 10.0%, 18.8% and 30.2% in the manufacturing costs of a steel shaft executed in steel grade S690, as compared to steel grades S620, S550, S500, S450 and S355 respectively (the S235 and S275 steels failed to ensure safety for the geometric constraints imposed by Metalgalva).

**KEYWORDS:** Transmission poles, high strength steels, wind, general method, costs



## ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS .....	i
RESUMO .....	iii
ABSTRACT .....	v

## 1 INTRODUÇÃO ..... 1

1.1 A CONSTRUÇÃO METÁLICA NO MUNDO .....	1
1.2 A UTILIZAÇÃO DE AÇOS DE ALTA RESISTÊNCIA NA ENGENHARIA CIVIL.....	5
1.3 POSTES DE TRANSMISSÃO .....	10
1.4 OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO .....	12
1.5 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO .....	13

## 2 AÇOS ESTRUTURAIS ..... 15

2.1 INTRODUÇÃO .....	15
2.2 ESTRUTURA CRISTALINA DO FERRO .....	16
2.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS AÇOS.....	19
2.3.1 DEFORMAÇÃO ELÁSTICA .....	19
2.3.2 DEFORMAÇÃO PLÁSTICA .....	21
2.3.3 TENACIDADE, FRATURA DÚCTIL E FRATURA FRÁGIL .....	23
2.3.4 EFEITO DA TEMPERATURA.....	25
2.3.5 VARIABILIDADE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS .....	25
2.4 EFEITOS DOS ELEMENTOS DE LIGA .....	26
2.4.1 O CARBONO .....	26
2.4.2 OUTROS ELEMENTOS DE LIGA .....	29
2.5 MICROESTRUTURA .....	32
2.6 OTIMIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS .....	34
2.6.1 TRATAMENTOS MECÂNICOS E TERMOMECÂNICOS .....	34
2.6.1.1 Laminagem .....	34
2.6.1.2 Estiragem.....	35
2.6.1.3 Trefilagem .....	35
2.6.1.4 Torção.....	36
2.6.2 TRATAMENTOS TÉRMICOS.....	36
2.6.2.1 Recozimento .....	37
2.6.2.2 Normalização .....	37

2.6.2.3 Têmpera .....	37
2.6.2.4 Revenido .....	40
2.6.3 TRATAMENTOS TERMOQUÍMICOS .....	41
2.6.4 TRATAMENTOS SUPERFICIAIS .....	41
<b>2.7 CONSTRUÇÃO SOLDADA .....</b>	<b>41</b>
<b>2.8 PRODUÇÃO DO AÇO .....</b>	<b>44</b>
2.8.1 ALTO-FORNO .....	45
2.8.2 FORNO DE ARCO ELÉTRICO .....	49
2.8.3 OUTROS PROCESSOS E TÉCNICAS DE FABRICO DE AÇO .....	51
<b>2.9 CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DAS ESTRUTURAS DE AÇO .....</b>	<b>51</b>
<b>2.10 PRINCIPAIS TIPOS DE AÇOS UTILIZADOS EM ENGENHARIA CIVIL .....</b>	<b>52</b>
2.10.1 AÇOS ESTRUTURAIS FERRO-CARBONO .....	53
2.10.2 AÇOS MICROLIGADOS DE ELEVADA RESISTÊNCIA .....	53
2.10.3 AÇOS DE LIGA TEMPERADOS E REVENIDOS .....	53
2.10.4 AÇOS INOXIDÁVEIS .....	53
<b>2.11 ENQUADRAMENTO NORMATIVO E LEGISLATIVO DOS AÇOS PARA CONSTRUÇÃO METÁLICA .....</b>	<b>55</b>
2.11.1 EUROCÓDIGO 3 – PARTE 1-1 – REGRAS GERAIS E REGRAS PARA EDIFÍCIOS .....	55
2.11.1.1 Propriedades dos materiais .....	55
2.11.1.2 Ductilidade .....	58
2.11.1.3 Resistência à rotura frágil .....	58
2.11.1.4 Tolerâncias .....	58
2.11.1.5 Valores de cálculo das propriedades dos materiais .....	58
2.11.1.6 Propriedades segundo a espessura .....	59
2.11.1.7 Durabilidade .....	59
2.11.2 EUROCÓDIGO 3 – PARTE 1-10 – TENACIDADE DOS MATERIAIS SEGUNDO A SUA ESPESSURA .....	59
2.11.2.1 Escolha dos materiais para a tenacidade à fratura .....	59
2.11.2.2 Procedimento .....	59
2.11.2.3 Espessuras máximas admissíveis .....	60
2.11.3 EUROCÓDIGO 3 – PARTE 1-12 – REGRAS ADICIONAIS PARA A EXTENSÃO DA EN 1993 ATÉ AÇOS S700 .....	62
2.11.3.1 Regras adicionais para a Norma EN 1993-1-1 .....	62
2.11.3.2 Regras adicionais para a Norma EN 1993-1-6 .....	63
2.11.3.3 Regras adicionais para a Norma EN 1993-1-8 .....	63
2.11.3.4 Regras adicionais para a Norma EN 1993-1-10 .....	63



2.11.3.5 Regras adicionais para a Norma EN 1993-3-1 .....	64
2.11.3.6 Outras condicionantes .....	64
<b>3 AÇÕES REGULAMENTARES .....</b>	<b>65</b>
<b>3.1 AÇÃO DO VENTO .....</b>	<b>65</b>
3.1.1 IMPORTÂNCIA DO VENTO .....	65
3.1.2 ORIGEM DO VENTO .....	65
3.1.3 CIRCULAÇÃO GLOBAL IDEALIZADA .....	66
3.1.4 CIRCULAÇÕES REGIONAIS E LOCAIS .....	67
3.1.5 CARACTERIZAÇÃO REGULAMENTAR DA AÇÃO DO VENTO NO CORPO DA ESTRUTURA .....	69
3.1.6 VELOCIDADE MÉDIA DO VENTO EM ALTURA .....	69
3.1.6.1 Rugosidade do terreno .....	70
3.1.6.2 Orografia .....	72
3.1.6.3 Turbulência do vento .....	73
3.1.6.4 Pressão dinâmica de pico .....	74
3.1.7 FORÇAS EXERCIDAS PELO VENTO .....	75
3.1.8 COEFICIENTE DE FORÇA .....	75
3.1.8.1 Secções Poligonais Regulares .....	75
3.1.8.2 Secções circulares .....	77
3.1.8.3 Coeficiente de efeitos de extremidade .....	78
3.1.9 COEFICIENTE ESTRUTURAL .....	79
3.1.9.1 Turbulência do vento .....	80
3.1.9.2 Densidade espectral de potência adimensional .....	81
3.1.9.3 Coeficiente de resposta quase-estática .....	82
3.1.9.4 Fator de pico .....	82
3.1.9.5 Coeficiente de resposta em ressonância .....	82
3.1.9.6 Decremento logarítmico de amortecimento .....	83
3.1.10 VORTEX SHEDDING .....	84
3.1.11 FENÓMENO DE "OVALING" .....	88
<b>3.2 AÇÃO DOS CABOS .....</b>	<b>89</b>
<b>3.3 AÇÃO DO GELO .....</b>	<b>93</b>
<b>3.4 AÇÃO DA TEMPERATURA .....</b>	<b>95</b>
<b>3.5 AÇÃO SÍSMICA .....</b>	<b>96</b>
<b>3.6 COMBINAÇÃO DE AÇÕES .....</b>	<b>97</b>
<b>4 BASES DE PROJETO .....</b>	<b>99</b>

<b>4.1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>99</b>
<b>4.2 EFEITOS DE SEGUNDA ORDEM E ANÁLISE NÃO LINEAR GEOMÉTRICA .....</b>	<b>101</b>
<b>4.3 IMPERFEIÇÕES GEOMÉTRICAS .....</b>	<b>103</b>
<b>4.4 MÉTODO DE ANÁLISE .....</b>	<b>105</b>
<b>4.5 CLASSIFICAÇÃO E RESISTÊNCIA DAS SECÇÕES .....</b>	<b>106</b>
<b>4.6 ENCURVADURA .....</b>	<b>107</b>
4.6.1 ENCURVADURA GLOBAL.....	107
4.6.2 ENCURVADURA LOCAL.....	109
4.6.3 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS E MECÂNICAS DE SECÇÕES POLIGONAIS.....	111
4.6.4 RESULTADOS DO PROGRAMA DE CÁLCULO.....	116
4.6.4.1 Ábacos do rácio da área efetiva com a área elástica em função do rácio do diâmetro exterior com a espessura. ....	116
4.6.4.2 Ábacos do rácio do módulo de flexão efetivo com o módulo de flexão elástico em função do rácio do diâmetro exterior com a espessura .....	120
4.6.5 VERIFICAÇÃO DE SEGURANÇA À ENCURVADURA .....	124
<b>4.7 MÉTODO GERAL DE VERIFICAÇÃO DA ENCURVADURA POR FLEXÃO E ENCURVADURA LATERAL .....</b>	<b>124</b>
4.7.1 INTRODUÇÃO.....	124
4.7.2 COMPARAÇÃO COM O MÉTODO TRADICIONAL .....	125
4.7.3 EXEMPLOS DE INADEQUABILIDADES NA APLICAÇÃO DO MÉTODO CONVENCIONAL .....	128
4.7.3.1 Parâmetros de encurvadura .....	129
4.7.3.2 Irregularidades .....	129
4.7.3.3 Variações de esbelteza .....	130
<b>4.8 VERIFICAÇÃO DE SEGURANÇA AO ESFORÇO TRANSVERSO .....</b>	<b>130</b>
<b>5 DIMENSIONAMENTO .....</b>	<b>133</b>
<b>5.1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>133</b>
<b>5.2 CONSIDERAÇÕES DE PROJETO.....</b>	<b>133</b>
<b>5.3 CARACTERÍSTICAS DOS POSTES .....</b>	<b>134</b>
5.3.1 LOCALIZAÇÃO.....	134
5.3.2 GEOMETRIA .....	134
<b>5.4 AÇÕES DOS CABOS DE TRANSMISSÃO .....</b>	<b>136</b>
<b>5.5 COMBINAÇÃO DE AÇÕES .....</b>	<b>138</b>
<b>5.6 MODELAÇÃO .....</b>	<b>138</b>
5.6.1 MODELAÇÃO GEOMÉTRICA.....	138
5.6.2 MODELAÇÃO DA AÇÃO DOS CABOS .....	140
5.6.3 ANÁLISE MODAL.....	140

5.6.4 ANÁLISE DE ENCURVADURA.....	141
<b>5.7 DIMENSIONAMENTO DOS POSTES .....</b>	<b>142</b>
5.7.1 PROGRAMA INFORMÁTICO DE DIMENSIONAMENTO .....	142
5.7.2 PROCESSO DE DIMENSIONAMENTO .....	146
5.7.3 RESULTADOS .....	147
5.7.3.1 Família de postes de transmissão com 200mm de diâmetro no topo.....	148
5.7.3.2 Família de postes de transmissão com 350mm de diâmetro no topo.....	151
5.7.3.3 Família de postes de transmissão com 500mm de diâmetro no topo.....	154
5.7.3.4 Análise dos resultados obtidos .....	157
<b>6 ANÁLISE DE CUSTOS .....</b>	<b>159</b>
6.1 INTRODUÇÃO .....	159
6.2 AÇOS .....	159
6.3 GEOMETRIA DA SECÇÃO TRANSVERSAL .....	161
6.4 SOLDAS .....	162
6.5 GALVANIZAÇÃO.....	164
6.6 PINTURA.....	165
6.7 OUTROS CUSTOS.....	165
6.8 RESULTADOS.....	165
6.8.1 Aço S 355 .....	166
6.8.2 Aço S 450 .....	166
6.8.3 Aço S 500 .....	167
6.8.4 Aço S 550 .....	167
6.8.5 Aço S 620 .....	168
6.8.6 Aço S 690 .....	169
6.8.7 RESUMO .....	169
<b>7 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>171</b>
7.1 CONCLUSÕES .....	171
7.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....	172
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>175</b>



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1- Análise executada a uma das relíquias encontradas [2] .....	1
Figura 1.2- Iron Bridge em Inglaterra [4].....	2
Figura 1.3 - Construção do Empire State Building [6] .....	3
Figura 1.4 - Produção nacional de peças metálicas para construção [9] .....	4
Figura 1.5 - Produção europeia de peças metálicas para construção [9] .....	4
Figura 1.6 – Espessura necessária para resistir a um esforço axial de 10.000kN .....	6
Figura 1.7 - Viaduto de Milau [12].....	6
Figura 1.8 - Plataforma "Valhall" [13].....	7
Figura 1.9 - Edifício F da "Sony-Center" em Berlim [15] .....	7
Figura 1.10 - Estrutura treliçada do topo do Edifício F da "Sony-Center" em Berlim [14] .....	8
Figura 1.11 - Análise comparativa entre o aço HSA800 e SM570 na construção do edifício da Federação das Indústrias Coreanas [16] .....	8
Figura 1.12 - Análise comparativa entre o aço HSA800 e SM570 na construção da “Lotte World Tower” [16].....	9
Figura 1.13 - Análise comparativa entre o aço HSA800 e SM570 na construção do Centro Coreano para a Fotossíntese artificial [16] .....	9
Figura 1.14 - Poste de transmissão executado em aço ASTM A572-65 (tensão de cedência de 450MPa) [19].....	10
Figura 1.15 – Exemplos de transmissão elétrica: supercondutores enterrados, torres e postes de transmissão [20], [21], [22]. .....	11
Figura 2.1 - Descoberta de novos elementos ao longo do tempo [33] .....	15
Figura 2.2 - Magnetite e Hematite [37] .....	16
Figura 2.3 – Ferrite [38] .....	17
Figura 2.4 - Estrutura cúbica de corpo centrado [39].....	17
Figura 2.5 – Austenite [40].....	18
Figura 2.6 - Estrutura cúbica de faces centradas [39] .....	18
Figura 2.7 - Curva de tração uniaxial de um material metálico [35] .....	19
Figura 2.8 - Determinação da tensão de <i>offset</i> a 0,2% .....	20
Figura 2.9 - Cedência descontínua num aço-carbono macio .....	20
Figura 2.10 - Ciclo de carga e descarga onde a tensão de cedência é ultrapassada .....	21
Figura 2.11 - Fenómeno de estricção [42].....	22
Figura 2.12 - Estimativa de resiliência e tenacidade do material [35] .....	22
Figura 2.13 - Fratura dúctil obtida num ensaio Charpy [35] .....	23
Figura 2.14 - Fratura frágil obtida num ensaio Charpy [35].....	24
Figura 2.15 - Fratura mista obtida num ensaio Charpy [35].....	24
Figura 2.16 - Variação da tensão de cedência com a temperatura de um aço-carbono [35] .....	25
Figura 2.17 - Distribuição de propriedades mecânicas de 224 chapas de aço ASTM A285 [35].....	26
Figura 2.18 - Variação de propriedades do aço em função do teor de carbono [44] .....	26
Figura 2.19 - Movimento de uma deslocação (cunha) num cristal cúbico [35].....	27
Figura 2.20 - Cementite [46] .....	28
Figura 2.21 - Microestrutura bifásica do aço [47] .....	28
Figura 2.22 - Diagrama de fase ferro-carbono [44] .....	32
Figura 2.23 - Perlite de um aço Fe-0,5%C arrefecido lentamente desde o domínio austenítico [35] ....	33
Figura 2.24 - Transformação da microestrutura do aço em função da temperatura e do teor em carbono [49].....	33
Figura 2.25 - Processo de laminagem por cilindros [52].....	35

Figura 2.26 - Processo de trefilagem [51] .....	35
Figura 2.27 - Fieiras para trefilagem [53] .....	36
Figura 2.28 - Tratamentos térmicos em função da temperatura e teor de carbono [54].....	36
Figura 2.29 - Martensite [55] .....	37
Figura 2.30 - Diagrama TTT de um aço Fe-0,8%C [35].....	38
Figura 2.31 - Tipos de martensite. À esquerda a martensite em ripas e à direita a martensite acicular (ampliado 2000 vezes) [35] .....	39
Figura 2.32 – Bainite [56] .....	39
Figura 2.33 - Diagrama TTT de uma têmpera seguindo-se um revenido [48] .....	40
Figura 2.34 - Exemplo da variação das características do aço em função da temperatura de revenido [54] .....	40
Figura 2.35 - Esquema de um cordão de soldadura em corte transversal onde se apresenta a zona fundida (ZF), a zona termicamente afetada (ZTA) e o material base (MB) [35] .....	42
Figura 2.36 - Diagrama de Schaeffler [35].....	43
Figura 2.37 - Esquema de fabrico de aço pelo alto-forno [57].....	45
Figura 2.38 - Coque metalúrgico [58].....	45
Figura 2.39 - Esquema simplificado do funcionamento de um alto-forno (adaptado) [59] .....	46
Figura 2.40 - Carro torpedo [60] .....	47
Figura 2.41 - Evolução da afinação de uma gusa num convertidor [61].....	47
Figura 2.42 - Lingotes com aço líquido [62] .....	48
Figura 2.43 - Vazamento contínuo de aço líquido [57] .....	48
Figura 2.44 - Exemplo de "Slabs" e "Billets" - [63], [64].....	49
Figura 2.45 - Esquema de um forno de arco elétrico [46].....	49
Figura 2.46 - Eléktrodo de grafite [65].....	50
Figura 2.47 - Esquema de vazamento contínuo de aço de um forno de arco elétrico [61] .....	50
Figura 2.48 - Valores máximos admissíveis da espessura do elemento t, em mm (quadro 2.1) [71] ....	61
Figura 2.49 - Valores máximos admissíveis da espessura do elemento t, em mm [72] .....	64
Figura 3.1 - Circulação global idealizada dos ventos [83] .....	66
Figura 3.2 - Células de circulação globais [83] .....	67
Figura 3.3 - Brisa marítima e brisa terrestre [87] .....	68
Figura 3.4 - Ventos de vale e ventos de montanha [88].....	68
Figura 3.5 - Avaliação da rugosidade do terreno [90] .....	71
Figura 3.6 - Coeficiente s para falésias e escarpas [90] .....	72
Figura 3.7 - Coeficiente s para colinas isoladas ou em cadeia [90] .....	73
Figura 3.8 - Coeficiente de exposição (adaptado) [90] .....	74
Figura 3.9 - Secção poligonal regular [90].....	77
Figura 3.10 - Coeficiente de força para cilindros de base circular (adaptado) [90] .....	78
Figura 3.11 - Cálculo da altura de referência [90] .....	80
Figura 3.12 - Função de densidade espectral de potência [90].....	81
Figura 3.13 - Fenómeno de "Vortex Shedding" [96] .....	85
Figura 3.14 - Fenómeno de "Ovalling" [94].....	88
Figura 3.15 - Diagrama de forças de uma catenária [99] .....	91
Figura 3.16 - Diagrama de forças num apoio da catenária [99] .....	92
Figura 3.17 - Modelo de deposição do gelo de tipo esmalte [102] .....	94
Figura 3.18 - Efeito da radiação solar sobre o fuste do poste [81] .....	95
Figura 4.1 - Efeito de primeira ordem num poste (adaptado) [110] .....	101
Figura 4.2 - Efeito de segunda ordem num poste (adaptado) [110].....	102

Figura 4.3 - Análise não linear geométrica (adaptado) [110] .....	102
Figura 4.4 - Imperfeição global da estrutura, $\bar{\phi}$ , e forças equivalentes [30] .....	104
Figura 4.5 - Curvas momento-curvatura para as diversas classes de secção preconizadas pelo EC3 [99] .....	106
Figura 4.6 - Classificação de secções transversais tubulares sujeitas a flexão [101] .....	107
Figura 4.7 - Deformação lateral de um elemento esbelto submetido a uma carga de compressão, $P$ , superior à crítica, $P_{crítica}$ (encurvadura) [112] .....	108
Figura 4.8 - Elemento cuja encurvadura é pouco preocupante [111] .....	108
Figura 4.9 - Colapso de uma torre eólica devido à encurvadura local [113] .....	109
Figura 4.10 - Características da secção efetiva de classe 4 [101] .....	110
Figura 4.11 - Tabela 4.1 da EN 1993-1-5 para elementos internos comprimidos [67] .....	110
Figura 4.12 - Polígonos a considerar no cálculo .....	111
Figura 4.13 - Polígono de 12 lados com $n+1$ vértices numerados no sentido horário .....	112
Figura 4.14 - Ilustração genérica de uma face do polígono .....	114
Figura 4.15 - Razão entre a área efetiva e área elástica de secções transversais de classe 4 em aço S 235 .....	116
Figura 4.16 - Razão entre a área efetiva e área elástica de secções transversais de classe 4 em aço S 275 .....	117
Figura 4.17 - Razão entre a área efetiva e área elástica de secções transversais de classe 4 em aço S 355 .....	117
Figura 4.18 - Razão entre a área efetiva e área elástica de secções transversais de classe 4 em aço S 450 .....	118
Figura 4.19 - Razão entre a área efetiva e área elástica de secções transversais de classe 4 em aço S 500 .....	118
Figura 4.20 - Razão entre a área efetiva e área elástica de secções transversais de classe 4 em aço S 550 .....	119
Figura 4.21 - Razão entre a área efetiva e área elástica de secções transversais de classe 4 em aço S 620 .....	119
Figura 4.22 - Razão entre a área efetiva e área elástica de secções transversais de classe 4 em aço S 690 .....	120
Figura 4.23 - Razão entre o módulo de flexão efetivo e módulo de flexão elástico de secções transversais de classe 4 em aço S 235 .....	120
Figura 4.24 - Razão entre o módulo de flexão efetivo e módulo de flexão elástico de secções transversais de classe 4 em aço S 275 .....	121
Figura 4.25 - Razão entre o módulo de flexão efetivo e módulo de flexão elástico de secções transversais de classe 4 em aço S 355 .....	121
Figura 4.26 - Razão entre o módulo de flexão efetivo e módulo de flexão elástico de secções transversais de classe 4 em aço S 450 .....	122
Figura 4.27 - Razão entre o módulo de flexão efetivo e módulo de flexão elástico de secções transversais de classe 4 em aço S 500 .....	122
Figura 4.28 - Razão entre o módulo de flexão efetivo e módulo de flexão elástico de secções transversais de classe 4 em aço S 550 .....	123
Figura 4.29 - Razão entre o módulo de flexão efetivo e módulo de flexão elástico de secções transversais de classe 4 em aço S 620 .....	123
Figura 4.30 - Razão entre o módulo de flexão efetivo e módulo de flexão elástico de secções transversais de classe 4 em aço S 690 .....	124
Figura 4.31 - Fatores de amplificação para o método convencional e método geral [117] .....	128

Figura 5.1 – Secções transversais consideradas: octógono, dodecágono, hexadecágono e icoságono	134
Figura 5.2 – Ligação por encaixe [122], [91]	135
Figura 5.3 – Exemplo de um poste de características semelhantes [123]	136
Figura 5.4 – Diagrama de forças e localização dos cabos de transmissão no topo do poste	136
Figura 5.5 – Modelação do poste de transmissão em barras e nós	138
Figura 5.6 – Apoio rígido em todas as direcções	139
Figura 5.7 – Exemplo de uma introdução das características da secção transversal correspondente ao primeiro módulo do fuste	139
Figura 5.8 – Forças verticais que simulam a presença dos cabos de transmissão (kN) em ambos os casos considerados no dimensionamento (situação normal à esquerda e rebentamento de um cabo à direita)	140
Figura 5.9 – Conversão das forças nodais em massa	140
Figura 5.10 – Parâmetros de cálculo da análise modal	141
Figura 5.11 – Análise de encurvadura (Buckling) para a combinação de ações	141
Figura 5.12 – Parâmetros da análise de encurvadura	142
Figura 5.13 – Interface inicial do programa desenvolvido pelo autor	144
Figura 5.14 – Esquema da metodologia de cálculo do programa de dimensionamento produzido pelo autor	145
Figura 5.15 – Quadro com os resultados gerais do dimensionamento	146
Figura 5.16 – Processo de dimensionamento	147
Figura 5.17 – Peso de cada solução de dimensionamento para diâmetros de 200mm no topo e 1800mm na base	148
Figura 5.18 – Peso de cada solução de dimensionamento para diâmetros de 200mm no topo e 1700mm na base	148
Figura 5.19 – Peso de cada solução de dimensionamento para diâmetros de 200mm no topo e 1600mm na base	149
Figura 5.20 – Peso de cada solução de dimensionamento para diâmetros de 200mm no topo e 1500mm na base	149
Figura 5.21 – Peso de cada solução de dimensionamento para diâmetros de 200mm no topo e 1400mm na base	150
Figura 5.22 – Peso de cada solução de dimensionamento para diâmetros de 200mm no topo e 1300mm na base	150
Figura 5.23 – Peso de cada solução de dimensionamento para diâmetros de 350mm no topo e 1800mm na base	151
Figura 5.24 – Peso de cada solução de dimensionamento para diâmetros de 350mm no topo e 1700mm na base	151
Figura 5.25 – Peso de cada solução de dimensionamento para diâmetros de 350mm no topo e 1600mm na base	152
Figura 5.26 – Peso de cada solução de dimensionamento para diâmetros de 350mm no topo e 1500mm na base	152
Figura 5.27 – Peso de cada solução de dimensionamento para diâmetros de 350mm no topo e 1400mm na base	153
Figura 5.28 – Peso de cada solução de dimensionamento para diâmetros de 350mm no topo e 1300mm na base	153
Figura 5.29 – Peso de cada solução de dimensionamento para diâmetros de 500mm no topo e 1800mm na base	154



Figura 5.30 – Peso de cada solução de dimensionamento para diâmetros de 500mm no topo e 1700mm na base.....	154
Figura 5.31 – Peso de cada solução de dimensionamento para diâmetros de 500mm no topo e 1600mm na base.....	155
Figura 5.32 – Peso de cada solução de dimensionamento para diâmetros de 500mm no topo e 1500mm na base.....	155
Figura 5.33 – Peso de cada solução de dimensionamento para diâmetros de 500mm no topo e 1400mm na base.....	156
Figura 5.34 – Peso de cada solução de dimensionamento para diâmetros de 500mm no topo e 1300mm na base.....	156
Figura 6.1 - Evolução do preço por tonelada conforme a classe de aço .....	160
Figura 6.2 - Exemplo de uma chapa dobrada na máquina de quinagem [124].....	161
Figura 6.3 - Processo de dobragem de uma chapa metálica na Metalgalva [125], [91] .....	161
Figura 6.4 - Localização das soldas na secção transversal para diâmetros até 400mm e superior a 400mm .....	163
Figura 6.5 - Execução de uma solda por robot [123] .....	164
Figura 6.6 - Processo de galvanização [126] .....	164
Figura 6.7 - Características do poste mais económico em fabrico produzido com aço S 355.....	166
Figura 6.8 - Características do poste mais económico em fabrico produzido com aço S 450.....	166
Figura 6.9 - Características do poste mais económico em fabrico produzido com aço S 500.....	167
Figura 6.10 - Características do poste mais económico em fabrico produzido com aço S 550.....	167
Figura 6.11 - Características do poste mais económico em fabrico produzido com aço S 620.....	168
Figura 6.12 - Características do poste mais económico em fabrico produzido com aço S 620.....	168
Figura 6.13 - Características do poste mais económico em fabrico produzido com aço S 690.....	169
Figura 6.14 - Discretização dos preços dentro da solução mais económica para cada classe de aço ..	170
Figura 6.15 - Preço total da solução mais económica para cada classe de aço.....	170



## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1.1 - Área de aço necessária para resistir a um esforço de 10.000kN.....	5
Quadro 2.1 - Funções dos elementos de liga [48].....	31
Quadro 2.2 - Especificações e propriedades típicas de aços comuns na construção civil [35].....	54
Quadro 2.3 - Especificações e propriedades típicas de alguns aços inoxidáveis [35].....	55
Quadro 2.4 - Valores nominais da tensão de cedência e da tensão última à tração para aços estruturais laminados a quente [30] .....	56
Quadro 2.5 - Valores nominais da tensão de cedência e da tensão última à tração para secções tubulares [30].....	57
Quadro 2.6 - Valores nominais da tensão de cedência e tensão última à tração para aços estruturais laminados a quente [72] .....	62
Quadro 2.7 - Valores nominais da tensão de cedência e tensão última à tração para produtos planos laminados a quente [72] .....	62
Quadro 3.1 - Valor básico da velocidade de referência do vento em território nacional [90] .....	70
Quadro 3.2 - Parâmetros $z_0$ e $z_{\min}$ [90] .....	71
Quadro 3.3 - Coeficiente de força, $c_f,0$ , para secções poligonais regulares .....	76
Quadro 3.4 - Valores de $C_e$ , $K_a$ e $a_L$ [90].....	86
Quadro 3.5 - Propriedades dos diferentes tipos de gelo [102] .....	93
Quadro 3.6 - Classes para o gelo do tipo esmalte [102].....	94
Quadro 4.1 - Classificação das secções [30] .....	106
Quadro 5.1 - Forças nodais equivalentes dos cabos de transmissão para o caso de vento transversal em rajada.....	137
Quadro 5.2 - Forças nodais equivalentes dos cabos de transmissão para o caso de vento transversal e rebentamento de um cabo.....	137
Quadro 6.1 - Preços médios de cada classe de aço .....	160
Quadro 6.2 - Preço das quinagens.....	162
Quadro 6.3 - Preço das soldagens .....	163
Quadro 6.4 - Resumo de preços das soluções de dimensionamento mais económicas.....	169



# 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1 A CONSTRUÇÃO METÁLICA NO MUNDO

Em 1911, uma escavação em el-Gerzeh no Egito recuperou nove artefactos considerados como os objetos mais antigos de ferro alguma vez encontrados (Figura 1.1). O estudo destas peças revelou que são constituídas por uma liga de ferro e níquel e que a sua origem adveio de um meteorito que surgiu há mais de 5000 anos [1].

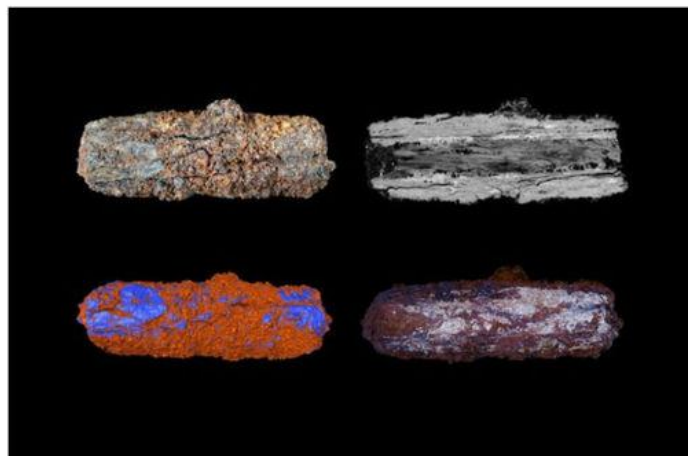


Figura 1.1- Análise executada a uma das relíquias encontradas [2]

A partir desta altura, e ainda no período neolítico (aproximadamente desde 10.000 a.C. até 3000 a.C.), existem vestígios, datados de 1500 a.C., das primeiras procuras do ferro para a produção de artefactos e peças, através de uma exploração regular dos minérios presentes no Oriente e na Grécia.

Com o passar dos anos e bastante mais tarde, o surgimento e expansão da Revolução Industrial, com início no fim do século XVIII, provocou uma grande modificação na metalurgia e no Mundo. A introdução das máquinas a vapor, laminadores, tornos mecânicos e outros acessórios, conduziram ao aumento da produção e transformaram o ferro e o aço num dos mais importantes materiais de construção.

Deste modo, em 1779 construiu-se a primeira ponte de ferro fundido, sobre o Rio Severn em Coalbrookdale, denominada por Iron Bridge e projetada pelo engenheiro Abraham Darby III e pelo arquiteto Thomas Pritchard [3] (Figura 1.2).



Figura 1.2- Iron Bridge em Inglaterra [4]

Após 22 anos [5], surge o primeiro edifício industrial produzido em ferro, em Manchester, na Inglaterra e no período compreendido entre 1837 e 1840, os ingleses e franceses desenvolvem o processo de galvanização e as chapas corrugadas galvanizadas.

Em 1850 ocorre a segunda Revolução Industrial, período onde “a máquina produz outras máquinas” e onde o ferro é amplamente empregue, como por exemplo nos caminhos-de-ferro, nas locomotivas, nos navios, nos edifícios, na maquinaria e nas instalações sanitárias. É por esta altura que se cria os primeiros mercados internos e externos do ferro.

Com a utilização do ferro na construção civil surgiram muitos edifícios significativos em termos tecnológicos e marcantes pela inovação arquitetónica como é o caso do Palácio de Cristal, construído em 1851 em Londres por Joseph Paxton.

Já em 1854 surge a primeira laminação de perfis de formato geométrico “I”, em conjunto com a primeira *Normalização da Construção Civil*, e em 1855 é erguida a primeira ponte de grande vão executada com vigas de ferro fundido.

Henry Bessemer, engenheiro metalurgista, patenteou em 1855 o processo de “Bessemer” com vista à produção de aço a partir do ferro. Assim surgiu em 1862 uma das primeiras aplicações desta liga metálica na arquitetura pela construção das Estações Ferroviárias do Norte em Paris.

Em 1864 surge um novo alto-forno que permite a produção de aço de alta qualidade. Desenvolvido pelos conhecimentos de Pierre E. Martin e Wilhelm Siemens, o processo de produção Siemens-Martin possibilitou a conceção estrutural metálica de edifícios de grandes alturas.

Com o incêndio que devastou a cidade de Chicago, no estado de Illinois, em 1871 e com a sua reconstrução, formou-se a “Escola de Chicago” que fomentou o aparecimento e produção de edifícios de grande envergadura.

Durante a década compreendida entre 1880 e 1890, o maior produtor de aço do Mundo passa a ser os Estados Unidos que superam a produção de aço da Inglaterra e Alemanha juntas. Neste último ano surgem também aços com características diferenciadas através de outros elementos de liga como o manganês, níquel e cobre. Em 1930, inicia-se a construção, em Nova Iorque, do mais alto arranha-céus do Mundo com 102 pisos e estrutura metálica: o Empire State Building (Figura 1.3).



Figura 1.3 - Construção do Empire State Building [6]

Desde então, e até aos dias atuais, o aço tem sido constantemente empregue pelo Homem nas mais diversas edificações, mesmo após a introdução e exploração do betão no sector da construção civil.

Segundo a *World Steel Association* [7], o aço constitui atualmente um papel fundamental no desenvolvimento das sociedades modernas e onde o sector da construção corresponde a uma das indústrias mais importantes na sua utilização, podendo representar até 50% da produção mundial.

Em Portugal, de acordo com os dados dos relatórios estatísticos de produção industrial do Instituto Nacional de Estatística de 2009-2011 [8], a construção metálica foi responsável por 0,75% do PIB em 2011, emprega cerca de 16 mil profissionais e representa 300 milhões de euros da exportação nacional devido à produção e fabricação interna de estruturas metálicas.

Conforme a *European Convention for Constructional Steelwork* [9], Portugal produziu, em 2009, cerca de 140 mil toneladas de peças metálicas para construção enquanto a Alemanha produziu 1985 mil toneladas, tal como se apresenta na Figura 1.4 e Figura 1.5.

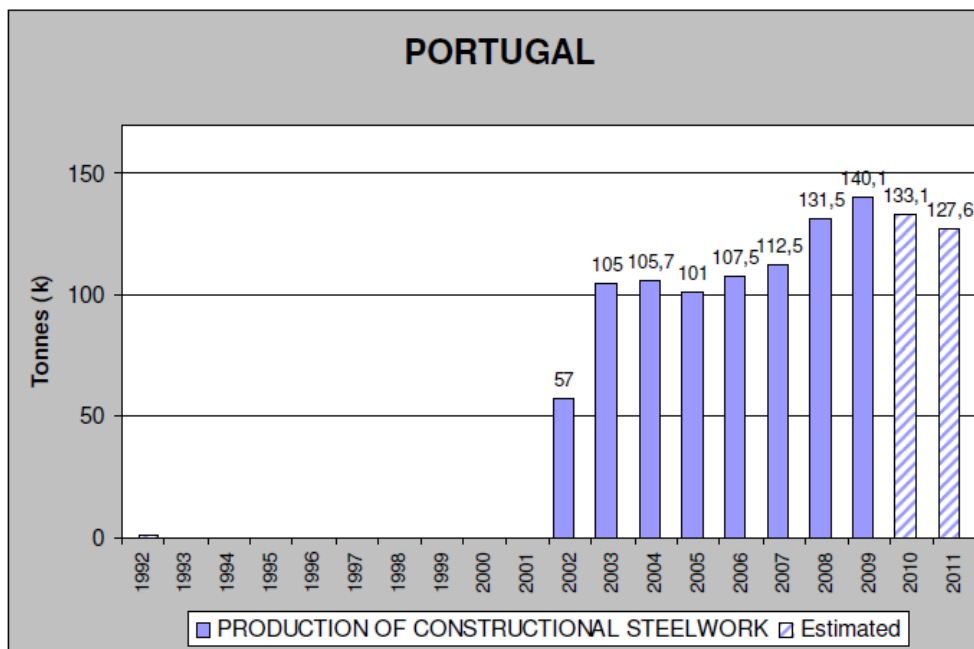


Figura 1.4 - Produção nacional de peças metálicas para construção [9]

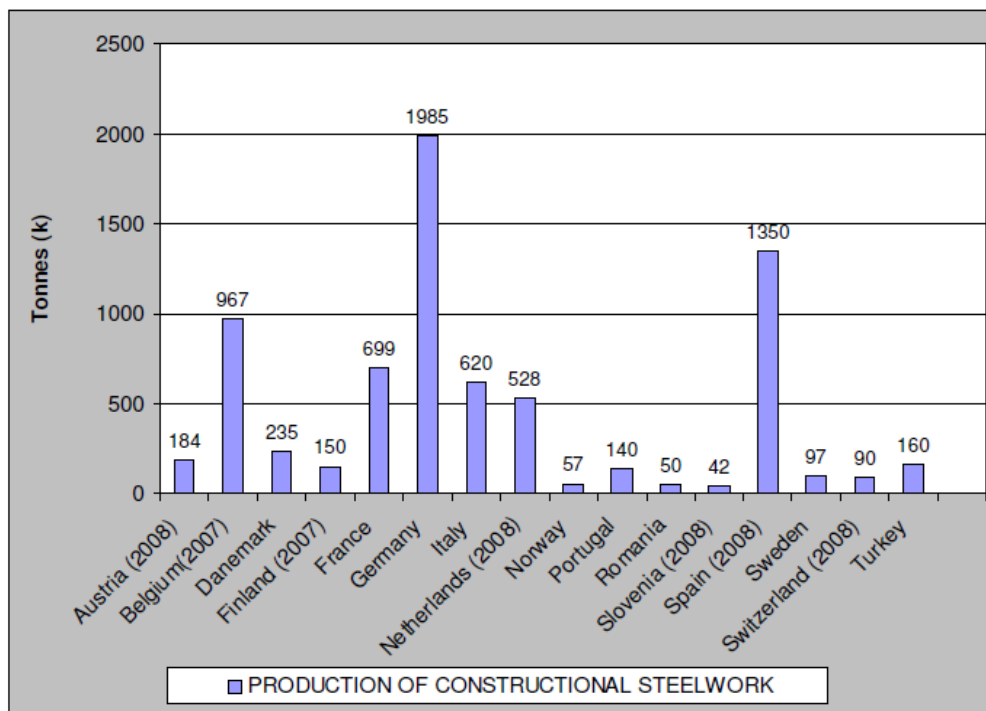


Figura 1.5 - Produção europeia de peças metálicas para construção [9]



## 1.2 A UTILIZAÇÃO DE AÇOS DE ALTA RESISTÊNCIA NA ENGENHARIA CIVIL

Os aços, que serão explicados de forma mais detalhada no capítulo seguinte, apresentam uma característica, denominada como tensão de cedência, que qualifica e representa de uma forma geral, a sua capacidade resistente. O valor da tensão de cedência (tensão a partir do qual o material inicia a plastificação) permite, entre outros parâmetros, a identificação e classificados dos aços aquando a sua apresentação no mercado. Atualmente existe uma grande gama de aços com características comportamentais muito distintas para estruturas metálicas de engenharia civil, cujas tensões de cedência podem variar, habitualmente, entre 235MPa e 690MPa, existindo até cerca de 1100MPa. Tal como o nome indica, os aços de alta resistência são considerados geralmente como aqueles que possuem uma tensão de cedência superior a 500MPa [10] enquanto que os aços macios correspondem aos que possuem tensões de cedência menores.

A utilização de aços de alta resistência [11] tem ganho ao longo dos últimos tempos uma maior expressão comercial à medida que se foi conseguindo aumentar, através de novos processos de fabrico, a tensão de cedência dos aços e as suas capacidades resistentes à fratura e soldabilidade, que antigamente ainda eram bastante reduzidas. Como tal, as capacidades de resistência superiores destes aços permitem obter peças estruturais e secções transversais mais pequenas e esbeltas, com menor área de ocupação e com menor peso mas sem comprometer a segurança.

Apesar do seu preço unitário ser superior, os aços de alta resistência tornam-se competitivos em comparação com os aços macios na medida em que é necessário menos quantidade de material para satisfazer as mesmas necessidades.

Para uma simples análise comparativa estudou-se a área necessária de 8 classes de resistência de aço distintas para resistir a um esforço axial de 10.000kN ou cerca de 1019 toneladas (Quadro 1.1 e Figura 1.6).

Quadro 1.1 - Área de aço necessária para resistir a um esforço de 10.000kN

Designação do aço	Tensão de cedência de acordo com o Eurocódigo 3 (MPa)	Área de aço necessária (m <sup>2</sup> )	%	Largura de um quadrado com área equivalente (m)
S 235	235	0,042553	+ 193,61	0,206284
S 275	275	0,036364	+ 150,91	0,190693
S 355	355	0,028169	+ 94,36	0,167836
S 450	440	0,022727	+ 56,81	0,150756
S 500	500	0,020000	+ 38,00	0,141421
S 550	550	0,018182	+ 25,45	0,134840
S 620	620	0,016129	+ 11,29	0,127000
S 690	690	0,014493	100	0,120386

S 690	S 620	S 550	S 500	S 450	S 355	S 275	S 235
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Figura 1.6 – Espessura necessária para resistir a um esforço axial de 10.000kN

Contudo, os aços de alta resistência implicam outro tipo de cuidados como por exemplo na soldadura, que caso seja inadequada pode provocar perdas de ductilidade e resistências pontuais ou na exposição a agentes atmosféricos ou marítimos, que devido à presença de secções mais esbeltas e finas e onde não haja uma correta proteção à corrosão, pode originar uma grande diminuição da vida útil da estrutura ou até mesmo uma falha estrutural prematura.

De uma forma geral, à medida que se escolhe um aço com uma tensão de cedência superior a sua capacidade resistente quando soldado vai sendo diminuída devido às alterações que o processo de soldagem implica na sua microestrutura. Isto origina um dilema para o projetista quando se depara com uma estrutura passível de ter várias ligações soldadas. Assim, a escolha de um aço com uma tensão de cedência moderada mas que possua uma boa soldabilidade pode ser uma vantagem sobre a utilização de aços de resistência superior e inferior.

De acordo com Schroter [11] os projetistas atuais têm ponderado e dado cada vez mais atenção aos aços de alta resistência nomeadamente em pontes de médio vão, edifícios industriais e elementos estruturais especiais. Por exemplo, no caso de uma ponte, a utilização de aços de alta resistência não só permite reduzir significativamente o peso próprio da obra (com um consequente aumento da capacidade de carga total da estrutura) como também permite reduzir o tamanho das secções transversais (com um aumento da altura útil da passagem inferior e com uma consequente diminuição da quantidade de soldadura e dos custos de inspeção, fabrico e instalação).

No Sul de França, o viaduto de Milau apresentado na Figura 1.7, com uma altura máxima de 343 metros e um comprimento de 2,46 km, possui um peso total de 43,000 toneladas de chapas de aço nas quais 18,000 toneladas são aço S460 utilizadas na viga-caixão principal para reduzir o peso e para otimizar a espessura dos elementos soldados por forma a se obter construção rápida e eficiente.



Figura 1.7 - Viaduto de Milau [12]

Semelhantemente, e de acordo com Billingham [10], a construção de estruturas e plataformas marítimas “offshore” têm incluído nos últimos tempos aços de alta resistência, com uma tensão de cedência superior a 350MPa, devido a um crescente interesse pelos projetistas em beneficiar de um rácio maior entre resistência/peso bem como na redução dos custos associados.

A plataforma “Valhall” ilustrada na Figura 1.8, construída pelas empresas Aker e Kvaerner, é um exemplo do referido anteriormente, e possui na sua estrutura a aplicação do aço S500 em espessuras até 65mm.



Figura 1.8 - Plataforma "Valhall" [13]

Em edifícios, a utilização de aços de alta resistência pode ser exemplificada no edifício F da “Sony-Center” em Berlim (Figura 1.9) [14]. Este é constituído por 134 apartamentos de luxo, dispostos em 7 pisos, que se encontram suspensos num vão de 60 metros sobre a fachada do antigo “Grand Hotel Esplanade”, destruído na Segunda Guerra Mundial.



Figura 1.9 - Edifício F da "Sony-Center" em Berlim [15]

A sua estrutura treliçada no topo tem 12 metros de altura, encontra-se fixa em três pilares e as suas vigas são constituídas por uma secção em caixa soldada, realizadas em aço S460 de espessuras até 110mm. Devido à grande concentração de tensões, os nós entre flanges e diagonais das extremidades são constituídos por placas de aço S690 com 100mm de espessura, tal como se apresenta na Figura 1.10.

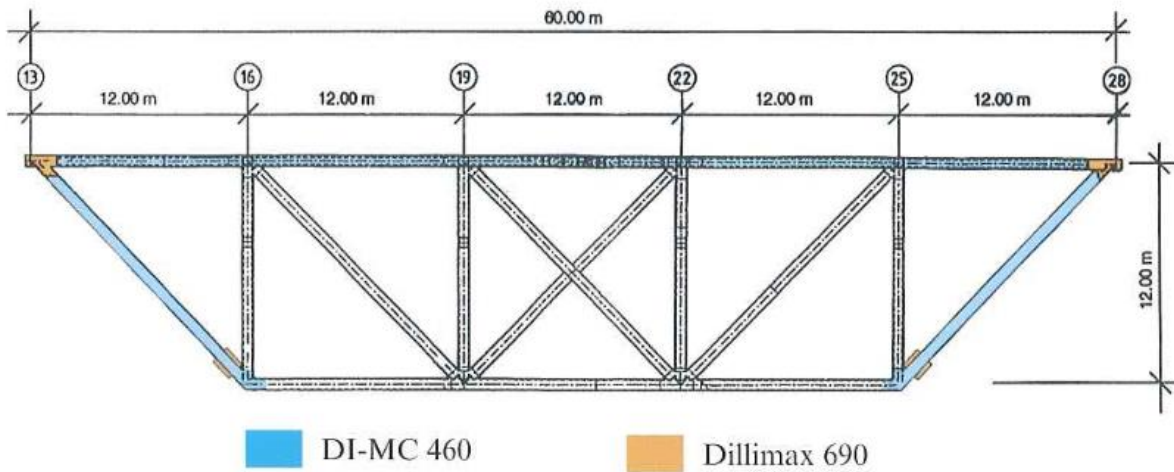


Figura 1.10 - Estrutura treliçada do topo do Edifício F da "Sony-Center" em Berlim [14]

A aplicação de um aço de alta resistência com uma tensão de cedência de 770MPa (HSA800) e respetivas poupanças face a aços de menor resistência pode ser verificado nos três casos seguintes [16]:

- Edifício da Federação das Indústrias Coreanas: a construção da secção "OT" com o aço HSA800, que é 140% mais resistente que o aço SM570 (tensão de cedência de 460MPa), permite poupar cerca de 30% de material (Figura 1.11);

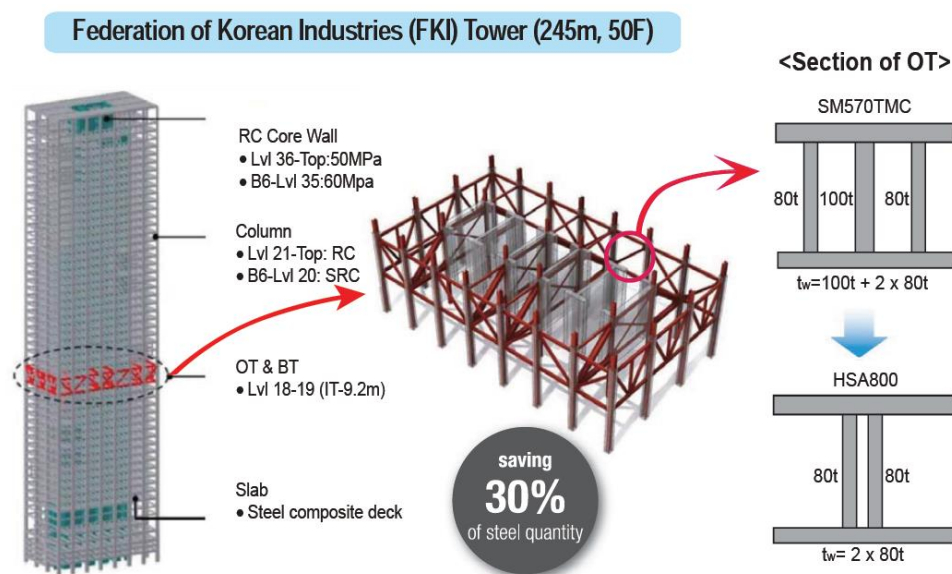


Figura 1.11 - Análise comparativa entre o aço HSA800 e SM570 na construção do edifício da Federação das Indústrias Coreanas [16]



- “Lotte World Tower”: um edifício com 555 metros, ainda em construção em Seul, e cuja utilização do aço HSA800 ao invés do aço SM570 permite poupar entre 30% a 40% de aço (Figura 1.12);

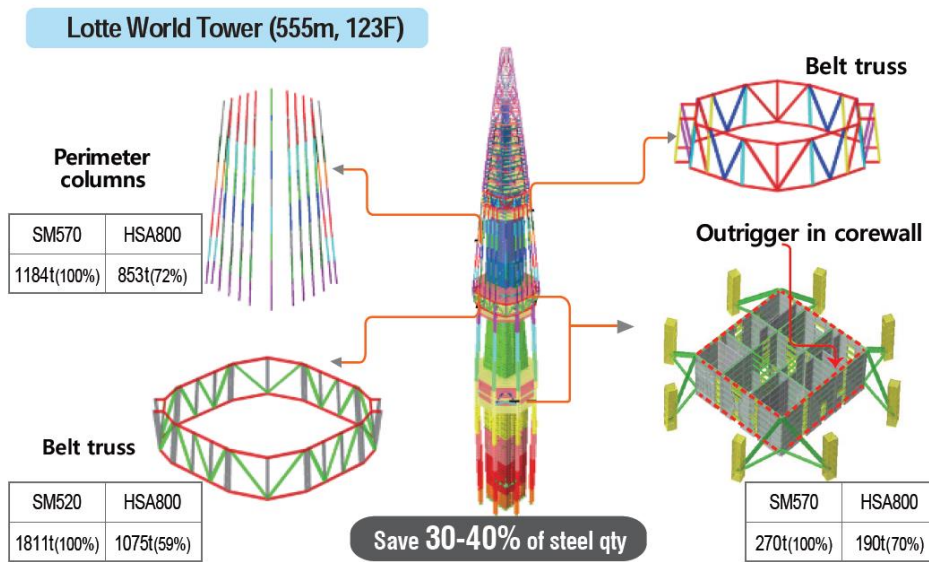


Figura 1.12 - Análise comparativa entre o aço HSA800 e SM570 na construção da “Lotte World Tower” [16]

- Centro Coreano para a Fotossíntese Artificial: um edifício protótipo onde a construção pelo aço HSA800, ao invés do aço SM570, nos pilares principais permite poupar entre 41% de aço e reduzir os custos até 13% (Figura 1.13).

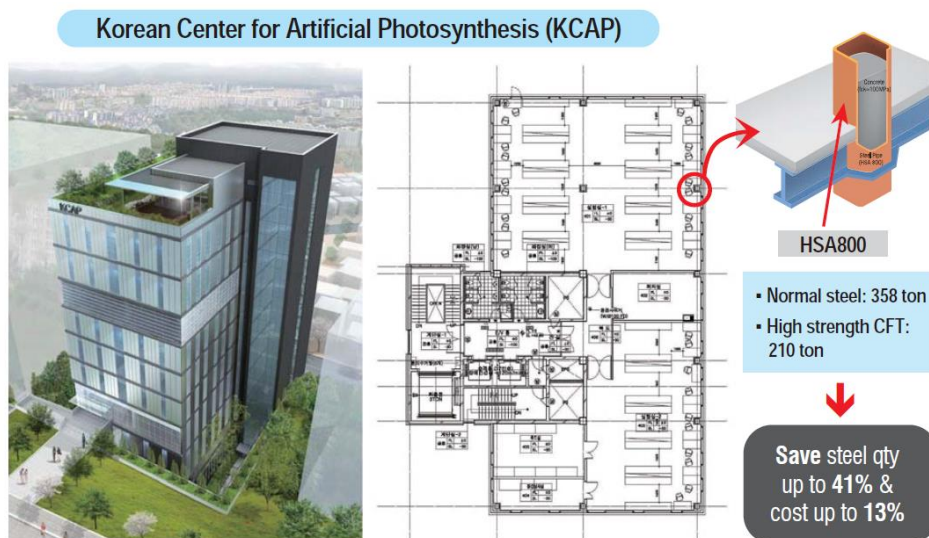


Figura 1.13 - Análise comparativa entre o aço HSA800 e SM570 na construção do Centro Coreano para a Fotosíntese artificial [16]

No caso dos postes de transmissão, a preferência de aços com uma tensão de cedência superior para a construção do fuste, permite obter uma esbelteza e estabilidade maior das secções que compõem a torre, pois oferecem menor resistência às ações do vento (menor área de exposição) [17]. Atualmente já existem corporações que utilizam o aço ASTM A572-65, cuja tensão de cedência é de 450MPa, no fabrico de fustes de postes de transmissão [18] (Figura 1.14).



Figura 1.14 - Poste de transmissão executado em aço ASTM A572-65 (tensão de cedência de 450MPa) [19]

### **1.3 POSTES DE TRANSMISSÃO**

A energia elétrica traduz-se numa das mais nobres formas de energia secundária e é de fácil geração, transportação, distribuição e transformação em outras formas de energia. Isto atribui-lhe um papel fundamental na sociedade na medida em que proporciona trabalho, produtividade, desenvolvimento, conforto, comodidade e bem-estar aos seus cidadãos. Deste modo, cada vez mais o Homem se torna dependente do fornecimento de energia elétrica para a evolução e sucesso das populações. Assim, é essencial planejar e construir infraestruturas que permitam o transporte de eletricidade desde as estações de produção até aos locais onde esta é necessária. Podem ser consideradas duas alternativas para a condução de eletricidade: através de cabos implantados no subsolo, por exemplo pelo meio de supercondutores, ou através de cabos de transmissão aéreos, colocados em torres treliçadas metálicas ou em postes fabricados em aço, betão ou madeira.



Figura 1.15 – Exemplos de transmissão elétrica: supercondutores enterrados, torres e postes de transmissão [20], [21], [22].

Os postes de transmissão, cujo presente trabalho visa o seu estudo, é um tipo particular das várias estruturas mencionadas que fazem parte da grande rede de condução de eletricidade que cobre todo o território nacional. Isto implica a existência de um grande número de postes, a trabalhar em situações muito variadas resultantes da diversidade da geometria das linhas de transmissão e do modo de carregamento que estas lhes impõem.

Deste modo, os postes encontram-se sujeitos a um espectro muito variável de ações: peso próprio do poste e cabos condutores, forças do vento, forças de desvio características dos postes de amarração em ângulo e as forças resultantes de um eventual rebentamento de cabos.

Com efeito, esta multiplicidade de parâmetros poderia originar uma extensa variedade de soluções caso cada poste fosse analisado e projetado como caso único e individual. No entanto, com a procura constante da economia do fabrico e do projeto das linhas de transmissão e respetivos postes, torna-se de grande interesse sistematizar e reduzir esta grande diversidade de situações a situações/casos tipo. Neste caso, gera-se então um conjunto de postes-tipo capazes de satisfazer as necessidades de um conjunto de ocorrências relativamente amplo.

Assim, irá existir um grande número de repetições de cada tipo de poste o que suscita um interesse ainda mais profundo na pesquisa da solução menos dispendiosa. Justifica-se por isso o recurso a métodos de análise numéricos e experimentais na procura das soluções mais adequadas por forma a se obter um conjunto de postes com elevadas características de polivalência e economia.

Este último fator é atingido através de um estudo exaustivo sobre a tipologia e geometria ideal de modo a se conseguir pesos mínimos tendo sempre presentes outros aspetos, nomeadamente referentes ao fabrico, transporte e instalação, que contribuem para a economia total e versatilidade da solução.

A escolha deste tipo de suporte para as redes de transmissão elétrica em detrimento de outras opções recai sempre sobre vários aspetos técnicos e financeiros. No entanto, apresentam-se algumas das vantagens que a escolha de postes de aço para a transmissão aérea de eletricidade permite obter [18]:

- Podem ser colocados de forma eficiente ao longo de estradas e caminhos-de-ferro;
- Possuem um menor impacto visual no ambiente;
- Cerca de 76% dos cidadãos prefere postes em vez das torres treliçadas;
- Um poste típico é constituído, em média, por apenas 15 ou menos elementos;
- Podem ser montados em menos de três dias enquanto uma torre demora entre uma e duas semanas [23];

- Toda a estrutura pode ser montada no solo e depois levantada para a posição final;
- Permite a instalação de várias estruturas por dia;
- Flexibilidade na configuração e utilização estrutural;
- Ações do vento menores devido a uma menor área de exposição;
- Em caso de rebentamento de um cabo, a flexibilidade da estrutura permite reduzir as tensões do cabo remanescente no vão intacto e permite induzir um menor momento flector na base;
- Em casos onde as torres treliçadas colapsaram devido a tempestades e tornados, os postes mantiveram-se intactos.
- As suas fundações ocupam menos área;
- Podem ser instalados em locais com uma área útil muito reduzida;

A título de exemplo deste último ponto, Sakiyama [24] compara a área necessária para a implantação de uma torre para telecomunicações de 60 metros de altura: enquanto um poste requer uma base de dimensão de apenas 2 ou 3 metros de lado, uma torre autoportante treliçada necessita de 225m<sup>2</sup> (15m x 15m) e uma estaiada 5000m<sup>2</sup> (80 metros de diâmetro).

Por outro lado apresentam algumas desvantagens como por exemplo:

- Maior custo de manutenção por não se ter acesso ao interior das secções [23];
- A humidade no interior do poste pode originar problemas de corrosão interna [25];
- As torres treliçadas possuem um alto valor da componente aerodinâmica do amortecimento devido à grande distribuição da sua massa. Componente que geralmente é maior que a componente do amortecimento estrutural [26];
- O custo estrutural costuma ser um pouco mais elevado que as torres treliçadas equivalentes [18];
- Tendência para vibrações de ressonância quando submetidas à ação do vento, uma vez que a frequência própria da estrutura é relativamente próxima da frequência da ação [27]
- As torres treliçadas têm muito pouco impacto visual a grandes distâncias.

#### 1.4 OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação enquadra-se no projeto de investigação e desenvolvimento *Very High Strength Steel Poles* (VHSSPoles – ref. 21518), realizado no consórcio entre a empresa Metalgalva e a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto [28], [29].

Os seus objetivos têm como alvo a análise comparativa do dimensionamento e produção de postes de transmissão executados em aço macio e em aço de alta resistência.

As análises comparativas efetuadas tiveram por base a modelação e projeto de vários mastros constituídos por aços de classe S235 até S690 e com características geométricas distintas.



## **1.5 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO**

O presente trabalho encontra-se distribuído em 7 capítulos. Neste primeiro capítulo é apresentada a introdução e o enquadramento teórico do estudo realizado.

No capítulo 2 apresenta-se os fundamentos físicos e características próprias dos aços estruturais, bem como o seu processo de fabrico e Normas em vigor para a sua correta utilização neste estudo.

O capítulo 3 expõe as ações regulamentares principais para o projeto de dimensionamento de um poste de transmissão, nomeadamente a ação do vento, a ação dos cabos condutores, a ação da temperatura e a ação sísmica, e as respetivas disposições normativas.

O capítulo 4 é dedicado às bases e considerações prévias para o projeto de um poste de transmissão. É ainda apresentado o novo método geral de verificação da encurvadura por flexão e da encurvadura lateral de componentes estruturais, presente no ponto 6.3.4 do Eurocódigo 3 parte 1-1 [30].

No capítulo 5 realiza-se uma explicação do processo de dimensionamento como também da aplicação informática própria para o efeito desenvolvida pelo autor. Apresenta-se ainda os resultados obtidos de 296 possibilidades de dimensionamento para um poste com algumas formalidades pré-definidas.

O capítulo 6 desenvolve uma análise de custos de fabrico para os resultados anteriores a partir da qual se retira as características geométricas e mecânicas que permitem obter o poste de transmissão mais económico.

Por fim, no capítulo 7, são apresentadas as conclusões finais referentes aos objetivos propostos inicialmente, terminando com a sugestão de trabalhos futuros que possam ser realizados.



## 2 AÇOS ESTRUTURAIS

### 2.1 INTRODUÇÃO

No dia-a-dia da comunidade muitos dos materiais encontrados são metais. Estes possuem propriedades físicas bastante próprias como por exemplo: o brilho metálico, densidade, condutibilidade térmica e elétrica e a sua maleabilidade e ductilidade [31].

Estas características conferem capacidades peculiares que não são encontradas noutros elementos (condutibilidade e resistência apesar da deformabilidade) o que justifica a sua grande empregabilidade no quotidiano [32].

Dos elementos presentes na Tabela Periódica, 76% possuem propriedades metálicas [33]. Apesar de apenas nos últimos dois séculos se ter descoberto a grande maioria dos elementos metálicos alguns são já conhecidos há milénios, como o caso do ferro, ouro e cobre (Figura 2.1).

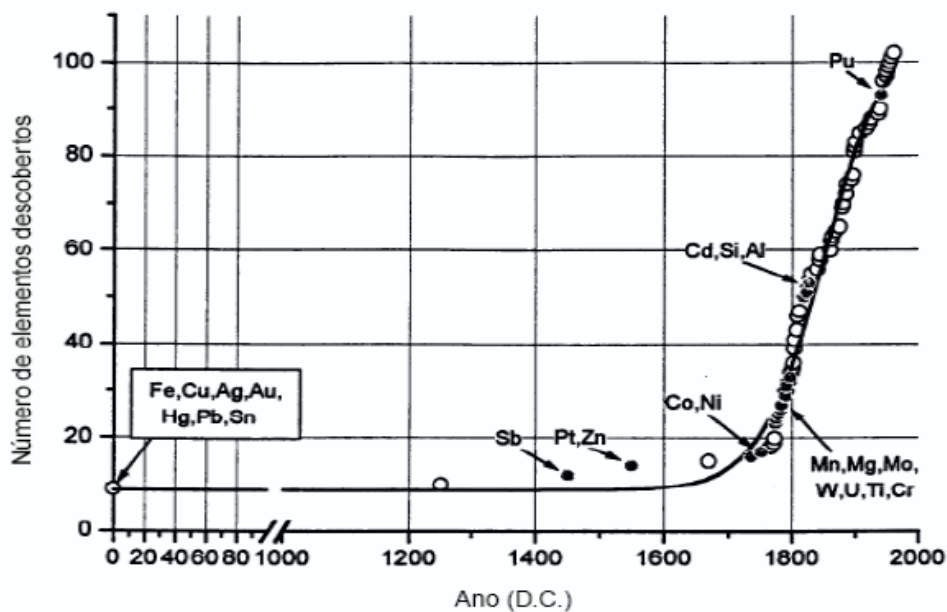


Figura 2.1 - Descoberta de novos elementos ao longo do tempo [33]

Contudo, muitos dos materiais metálicos encontrados e utilizados na atualidade são na realidade ligas metálicas.

Uma liga metálica consiste na mistura de dois ou mais elementos químicos (em que pelo menos um é metálico e os restantes podem ser não metálicos, como por exemplo o silício e o carbono) o que origina um material cujo estado líquido ou sólido possui propriedades metálicas. As ligas mais utilizadas incluem, essencialmente, o bronze (liga de cobre e estanho), o latão (liga de cobre e zinco), o aço carbono (liga de ferro e carbono) o aço inoxidável (liga de ferro e cromo) e a solda (liga de chumbo e estanho) [34].

Segundo Colaço [35] o termo “aço” designa um conjunto de materiais extraordinariamente diversificados (algumas centenas de ligas metálicas diferentes são designadas por “aço”), em termos de composição química, microestrutura, propriedades e, naturalmente, aplicabilidade. O seu principal constituinte é o ferro, ou seja, os aços são ligas metálicas à base de ferro.

Os aços carbono são uns dos mais importantes tipos de aço existentes. Apesar dos seus elementos essenciais serem o ferro e o carbono estes contêm sempre outros elementos secundários. De acordo com Chiaverini [36], o aço carbono pode ser definido como “uma liga Ferro-Carbono, que contém geralmente de 0,008% até aproximadamente 2,11% de carbono, além de outros elementos secundários (como silício, manganês, fósforo e enxofre), presentes devido aos processos de fabrico”.

A grande aplicabilidade e utilização dos aços à base de ferro na sociedade é também justificada (para além das suas propriedades excecionais) pela grande abundância de matérias-primas necessárias à sua produção e pelo seu preço competitivo. É um material capaz de ser produzido com características muito distintas por forma a atender um uso mais específico. Permite uma grande diversidade de produtos, desde um parafuso ou um fogão até uma ponte imponente ou um arranha-céus.

## 2.2 ESTRUTURA CRISTALINA DO FERRO

O ferro não surge na natureza de forma pura mas sim unido ao oxigénio sob a forma de óxidos de ferro, nomeadamente, a hematite e magnetite (Figura 2.2). Estes possuem uma aparência amarelada ou avermelhada e necessitam de ser reduzidos (extração do oxigénio do ferro) de modo a se obter o ferro metálico [35].



Figura 2.2 - Magnetite e Hematite [37]

Desconhece-se como foi alcançada pela primeira vez a redução do óxido de ferro. Especula-se que o ferro metálico resultou de fogueiras provocadas sobre areias ricas em óxidos de ferro onde o combustível seria madeira ou carvão. O carbono proveniente destes materiais teria retirado o oxigénio ao ferro (devido à maior afinidade) pelo que, sob as cinzas, teria ficado um material de carácter dúctil, com brilho acinzentado. Esse material seria o ferro metálico. Contudo, ao aquecer o óxido de ferro na fogueira, não só o óxido terá sido reduzido como também algum carbono terá migrado para dentro do ferro. Esta ligação daria assim origem, pela primeira vez, ao aço.

À temperatura ambiente, o ferro é um metal sólido. Assim, ao nível quântico os átomos de ferro encontram-se unidos entre si através de uma ligação química forte e específica – a ligação metálica. Neste tipo de ligação os átomos partilham os seus eletrões de valência, formando uma nuvem de eletrões livres à sua volta (banda de valência) que mantém a coesão do conjunto. É devido a esta esta banda que os metais detêm a capacidade de conduzir, com grande facilidade, a eletricidade.

Esta ligação metálica dispõe os átomos de ferro de forma organizada no espaço, designada por estrutura cristalina. Esta disposição espacial consiste numa geometria cúbica onde, à temperatura ambiente, oito átomos de ferro preenchem os vértices de um cubo virtual e um átomo de ferro ocupa o seu centro. A organização dos átomos de ferro nesta configuração constitui um cristal com uma estrutura cúbica de corpo centrado (CCC), tal como se ilustra na Figura 2.4. Este tipo de ferro – esta fase – designa-se por ferrite (Figura 2.3) e pode conter átomos de outros elementos químicos nela dissolvida.

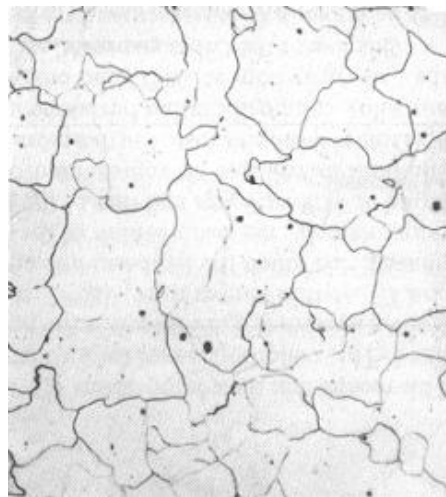


Figura 2.3 – Ferrite [38]

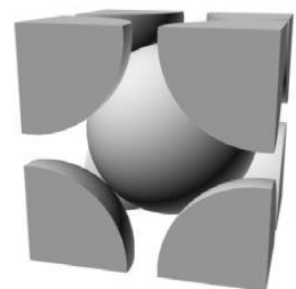
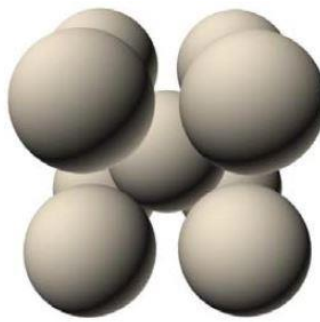
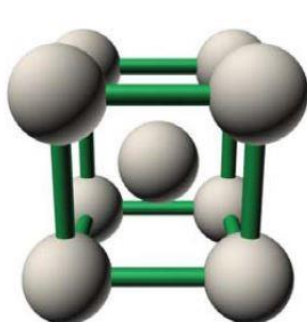


Figura 2.4 - Estrutura cúbica de corpo centrado [39]

Com o aumento de temperatura ocorrem transformações nesta disposição atômica. A partir de cerca de 912 °C os átomos de ferro alteram a sua geometria para um cristal de estrutura cúbica de faces centradas (CFC). Nesta configuração, oito átomos continuam a preencher os vértices do cubo virtual mas deixa de haver o átomo central passando a existir seis novos átomos no centro de cada uma das faces do cubo (Figura 2.6). Esta fase, designada por austenite (Figura 2.5), é mais densa e compacta que a ferrite. Esta transformação engloba uma contração do ferro que pode ter algumas implicações importantes nomeadamente a nível de acumulação de tensões internas, distorções e fissurações.

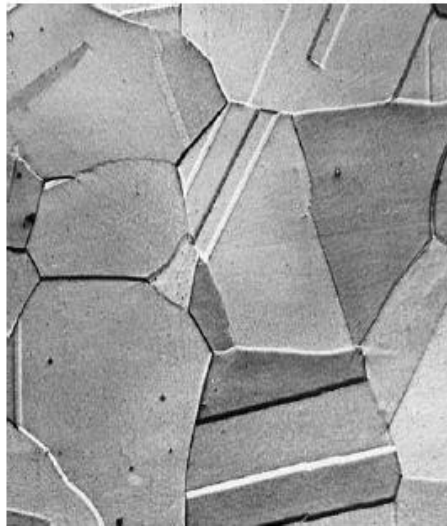


Figura 2.5 – Austenite [40]

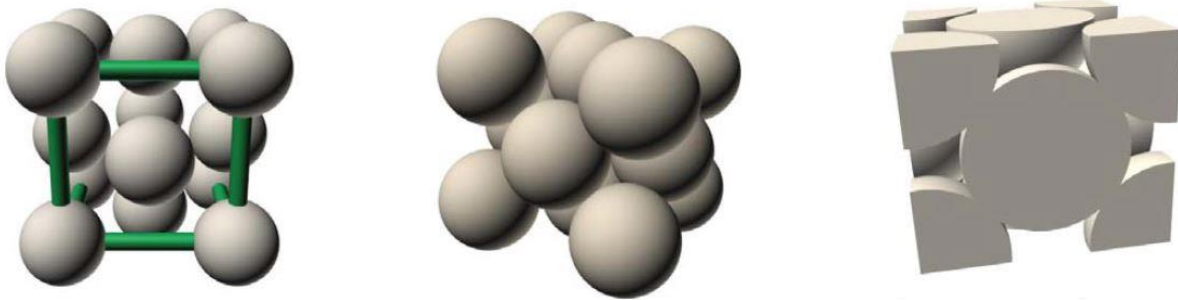


Figura 2.6 - Estrutura cúbica de faces centradas [39]

A cerca de 1394 °C, próximo do ponto de fusão do ferro a 1539 °C, a estrutura cristalina rearranja-se e retorna à sua configuração inicial de estrutura cúbica de corpo centrado (CCC).

Estas modificações internas durante o aquecimento são designadas por transformações alotrópicas e provocam implicações dramáticas sobre as propriedades dos aços.

## 2.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS AÇOS

De uma forma geral, os aços quer de construção quer os das restantes ligas metálicas, possuem ductilidade, ou seja, apresentam uma deformação plástica considerável antes de atingirem a rotura [35]. Esta é uma propriedade dos materiais na qual, sob a ação de uma força, estes se podem deformar sem partir. Um material muito dúctil suporta deformações consideráveis antes de atingir a rotura ao invés de materiais pouco dúcteis/frágeis que fraturam quase sem sofrerem deformação [41].

As curvas tensão-extensão permitem analisar um grupo de características e definir um conjunto de parâmetros fundamentais à caracterização das propriedades mecânicas dos aços. Estas curvas, obtidas através de ensaios de tração uniaxial, possuem uma apresentação semelhante à Figura 2.7:

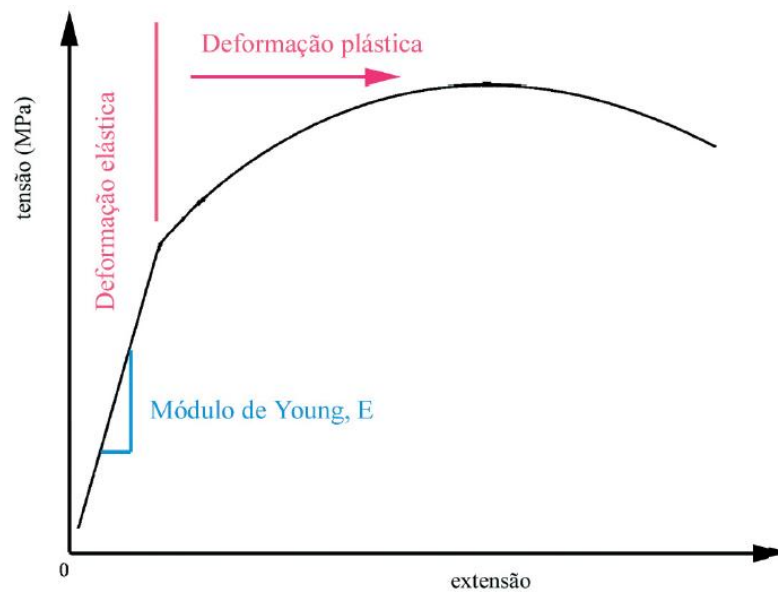


Figura 2.7 - Curva de tração uniaxial de um material metálico [35]

### 2.3.1 DEFORMAÇÃO ELÁSTICA

Na zona esquerda e primária da curva da Figura 2.7 a tensão varia linearmente com a extensão pelo que tem-se uma deformação elástica da peça ensaiada. O regime de deformação elástico caracteriza-se por uma total reversibilidade de deformações do material e retorno à sua forma original aquando o descarregamento e anulação de tensões. O declive da reta corresponde ao módulo de Young,  $E$ , que é um indicador da rigidez do material: quanto menor for este valor mais se deformará o material quando submetido a uma determinada tensão e vice-versa.

A área abaixo da curva tensão-extensão tem unidades de energia por unidade de volume. No domínio elástico esta área designa-se por resiliência e corresponde à energia máxima que o material pode absorver de forma reversível, isto é, que possa ser restituída totalmente ao exterior (Figura 2.9).

A tensão de cedência,  $\sigma_{ced}$  ou  $f_y$ , representa a tensão máxima a que o material pode ser submetido em regime elástico. Este parâmetro é de grande importância na medida em que o material em serviço numa estrutura nunca poderá estar submetido a uma tensão superior a este valor. Isso implicaria uma deformação permanente com consequente perda de funcionalidade.

Contudo, este valor nem sempre é de obtenção concreta e direta em todos os materiais pelo que por vezes é necessário recorrer a alguns critérios. Um método comum é traçar uma linha paralela à curva de tração desviada de 0,2% para a direita. A tensão de cedência a 0,2% corresponde ao ponto de intersecção da entre a linha e a curva de tração (ponto B na Figura 2.8). Este procedimento corresponde a uma sobre estimativa da tensão de cedência real (ponto A na Figura 2.8) pelo que é necessário compensar em projeto este desfase através de coeficientes de segurança apropriados.

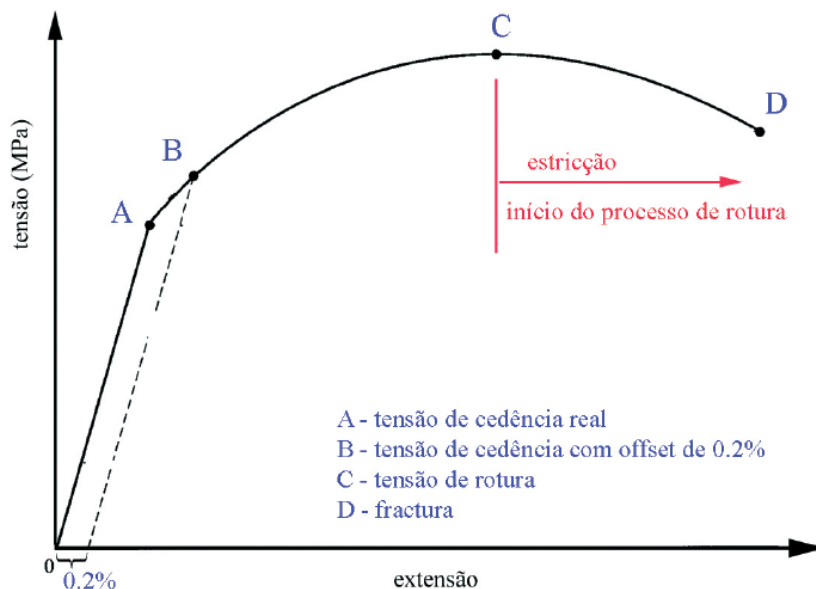


Figura 2.8 - Determinação da tensão de *offset* a 0,2%

Em aços macios recozidos (tipicamente aços com teores de carbono inferiores a 0,05%) este problema já não sucede na medida em que existe um patamar de cedência onde há uma transição visível entre o regime elástico para o domínio de deformação plástica, tal como se apresenta na Figura 2.9:

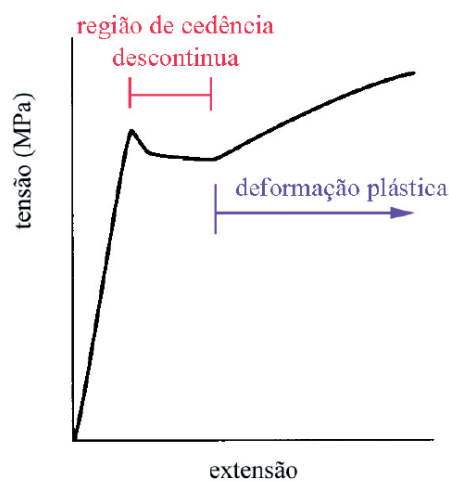


Figura 2.9 - Cedência descontínua num aço-carbono macio



### 2.3.2 DEFORMAÇÃO PLÁSTICA

Com a continuação do carregamento no ensaio de tração uniaxial e após a passagem do regime de deformação elástico o material entra no regime de deformação plástica (deformação permanente). A secção da curva de tração correspondente à deformação plástica ocorre quando não há uma variação linear da tensão com a extensão (Figura 2.10). Se a tensão de cedência for ultrapassada, o material ao ser descarregado no ensaio uniaxial apenas recuperará a parcela respeitante à deformação elástica e possuirá danos permanentes devido à sua deformação plástica, nomeadamente, o aumento de comprimento do provete de ensaio e redução da secção transversal.

A variação não linear tensão-extensão de ligas metálicas em regime plástico pode ser aproximada a uma lei de potência do tipo:

$$Tensão = K \cdot (extensão)^n$$

em que  $K$  e  $n$  são constantes que dependem do material analisado.

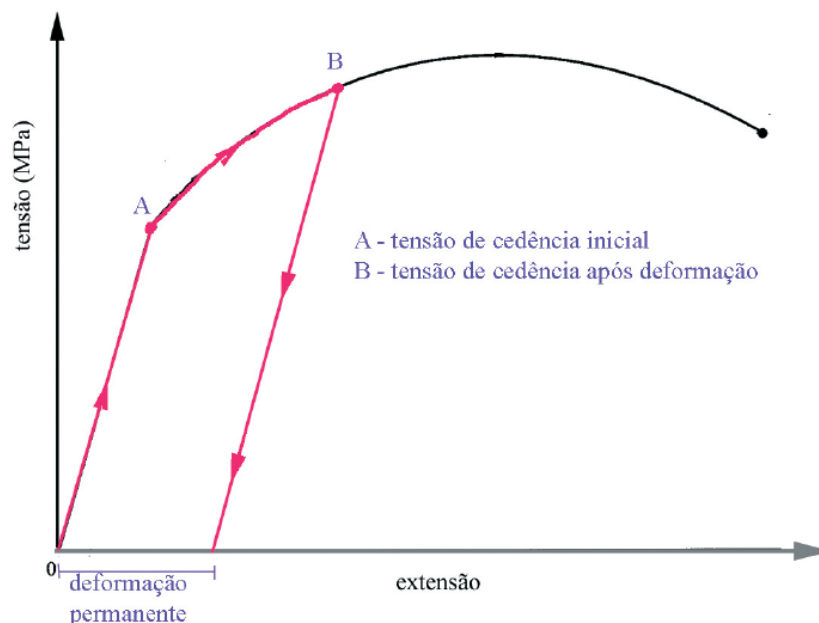


Figura 2.10 - Ciclo de carga e descarga onde a tensão de cedência é ultrapassada

Para que o metal continue a deformar plasticamente é necessário um aumento de tensão designado por endurecimento. Isto sucede até se atingir um máximo de tensão onde se inicia o processo de rotura que culmina na fratura total do material. Até esse máximo ser atingido a deformação plástica da amostra é uniforme designando-se, por isso, a tensão correspondente ao máximo por tensão máxima uniforme,  $\sigma_{mu}$ . A partir desta última surgem microfissuras no interior do material que se vão propagando até à fratura e a deformação deixa de ser uniforme: a velocidade de deformação na região onde aparecem as fissuras é superior à velocidade de deformação das restantes zonas do provete devido à concentração de tensões na vizinhança dessas fissuras de onde resulta uma deformação localizada. Esta última designa-se por zona de estricção (Figura 2.11) e é onde ocorre a fratura total do material.

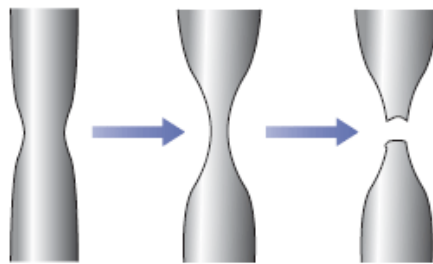


Figura 2.11 - Fenómeno de estricção [42]

O valor da tensão máxima uniforme,  $\sigma_{mu}$ , indica o limite máximo à deformação plástica a que o material pode ser submetido antes de ser colocado em serviço.

Em postes de transmissão cuja secção transversal é um poligonal regular, o seu fabrico implica a submissão das placas de aço à quinagem (dobragem). Se neste processo for ultrapassada localmente a tensão máxima uniforme então iniciou-se na região do painel afetado o processo de rotura, com formação de pequenas microfissuras no interior do material. Visto que estes danos não são detetáveis por observação (macro ou microscopicamente) é imprescindível o controlo deste fenómeno na medida em que são locais de concentrações de tensões, podendo-se propagar sucessivamente quando a estrutura se encontrar em serviço mesmo encontrando-se esta submetida a tensões inferiores à tensão de cedência (desenvolvendo fadiga e consequente colapso).

A tenacidade (resistência à rotura frágil) de um material também pode ser medida através da área abaixo da curva tensão-extensão. A esta área corresponde uma energia (por unidade de volume) absorvida pelo material desde o início da deformação até à fratura (Figura 2.12).

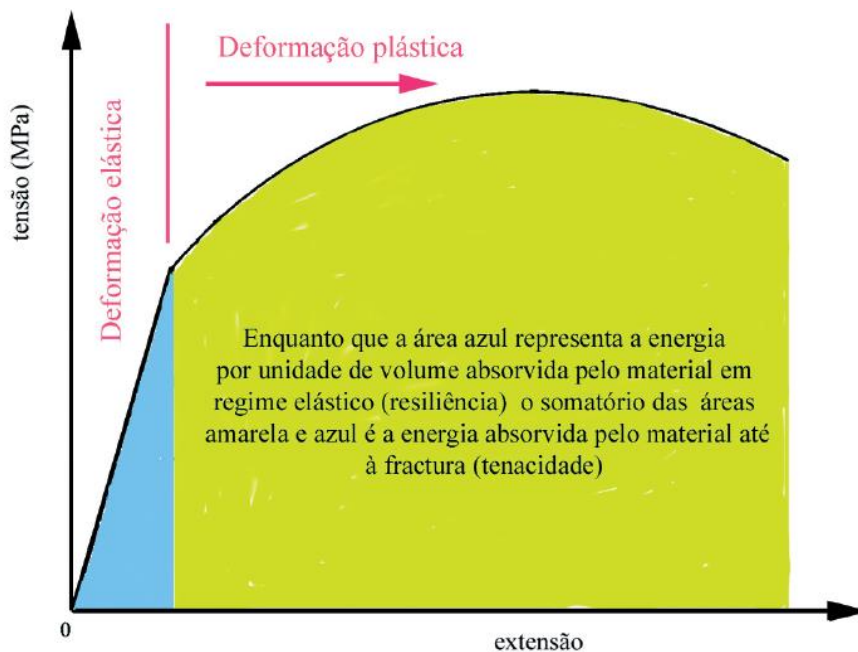


Figura 2.12 - Estimativa de resiliência e tenacidade do material [35]

### 2.3.3 TENACIDADE, FRATURA DÚCTIL E FRATURA FRÁGIL

A tenacidade é uma propriedade física dos materiais que corresponde à energia que estes podem absorver por deformação plástica antes de fraturar [41]. Sob certas condições os metais podem perder a sua característica de ductilidade passando a apresentar um comportamento frágil [43]. Este fenómeno ocorre de forma frequente quando, por exemplo, a temperatura a que o material se encontra é muito baixa ou quando a velocidade de aplicação de cargas é suficientemente alta.

É uma propriedade importante aquando a seleção de aços estruturais para serem empregues em estruturas cujas condições podem levar à fratura frágil (fratura brusca que ocorre com o mínimo de deformação plástica do material) [35].

A tenacidade de um material pode ser estimada por dois métodos:

- Pelo cálculo da área abaixo da curva tensão-extensão no ensaio de tração uniaxial. É um método pouco representativo da resposta do material a impactos súbitos, isto é, um aço que apresente uma tenacidade elevada para velocidades de deformações baixas poderá possuir um comportamento frágil se a velocidade de impacto for elevada;
- Por ensaios de impacto normalizados como é o caso do ensaio Charpy ou Izod onde um provete de geometria normalizada é sujeito a uma colisão com um pêndulo em movimento. Calcula-se a quantidade de energia absorvida pela amostra quando submetida à ação de um esforço de impacto de valor conhecido. A energia dissipada permite avaliar a tenacidade do material.

Estes últimos são os utilizados mais frequentemente. Permitem ainda determinar a temperatura de transição dúctil-frágil que alguns aços apresentam,  $TT_{dúctil/frágil}$ . Quando o material está submetido a uma temperatura abaixo desta temperatura crítica ( $TT_{dúctil/frágil}$ ), este deixa de usufruir um comportamento dúctil passando a apresentar um comportamento frágil. Alguns tipos de aços, como o aço inoxidável austenítico, não exibem esta transição enquanto alguns aços-carbonos apresentam uma transição dúctil-frágil em temperaturas próximas dos 0 °C. Esta característica é de grande interesse para o projetista durante a seleção de materiais caso a estrutura a edificar possa estar submetida a condições ambientais que envolvam diminuições acentuadas de temperatura.

O tipo de fratura do aço pode ser determinado através de uma análise de superfície da mesma:

- Uma superfície fibrosa com evidência de extensa deformação plástica está associada a uma fratura dúctil (Figura 2.13);

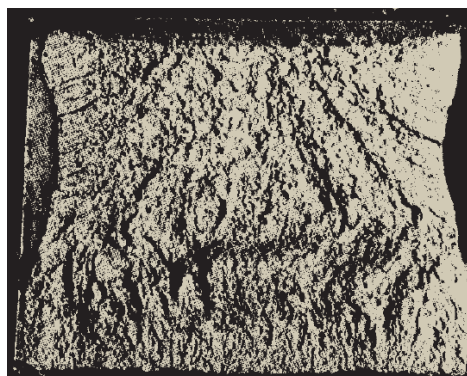


Figura 2.13 - Fratura dúctil obtida num ensaio Charpy [35]

- Uma superfície lisa e clivada está associada a uma fratura frágil (Figura 2.14);

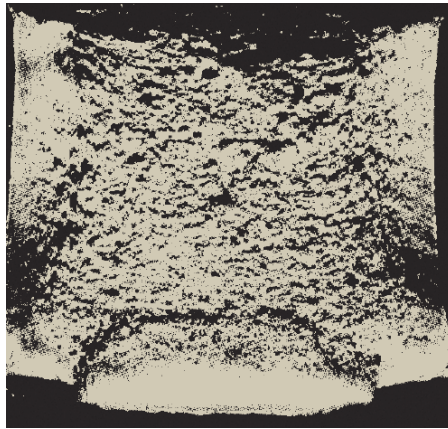


Figura 2.14 - Fratura frágil obtida num ensaio Charpy [35]

- Uma superfície com características de ambos os anteriores (Figura 2.15);



Figura 2.15 - Fratura mista obtida num ensaio Charpy [35]

De um modo geral, a tenacidade deve ser sobretudo considerada quando a peça possui pontos com concentração de tensões, como por exemplo discontinuidades, furos, pontos de soldagem ou chanfros agudos.

Aços com teores de carbono mais reduzidos e grão mais refinado geralmente possuem uma tenacidade superior comparativamente com outros aços. O recozimento de alívio de tensões, realizado através de um aquecimento e estágio do aço a temperaturas entre 250 °C a 400 °C seguida de um arrefecimento lento, também pode levar a um acréscimo da tenacidade do aço.

### 2.3.4 EFEITO DA TEMPERATURA

A temperatura constitui um fator determinante nas propriedades mecânicas dos aços. Temperaturas superiores a 500 °C originam alterações da microestrutura do material e consequentes reduções abruptas das tensões de cedência,  $f_y$ , e fratura,  $f_u$ , e do módulo de Young,  $E$ .

Este último, que é sensivelmente igual a 200GPa à temperatura ambiente, a cerca de 480 °C decresce para 170GPa. Com o sucessivo aumento da temperatura do material resulta uma perda total de resistência e rigidez do mesmo, como se observa na Figura 2.16.

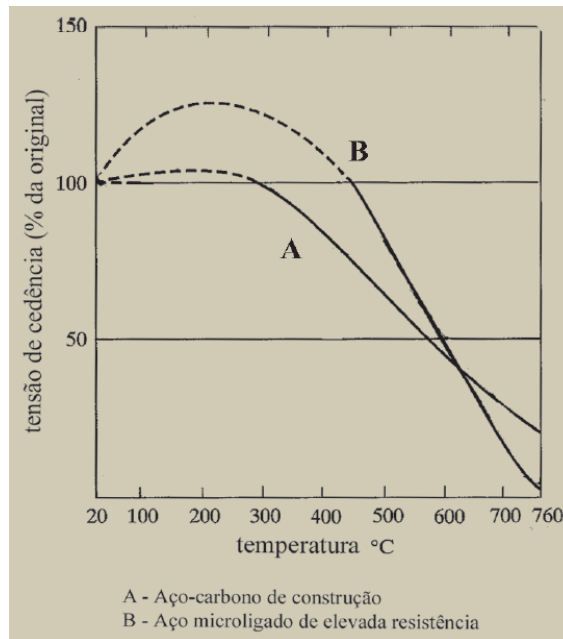


Figura 2.16 - Variação da tensão de cedência com a temperatura de um aço-carbono [35]

Deste fato se retira a importância da proteção do aço ao fogo, já que uma exposição prolongada ao mesmo pode resultar numa perda de capacidade de sustentação da estrutura e/ou danos irreparáveis na sua funcionalidade.

Por outro lado, as temperaturas elevadas provocam um aumento dos níveis de corrosão, desgaste e erosão da superfície do aço do qual poderá advir diminuição de espessuras e consequente perda de resistência devido a uma redução da secção útil.

### 2.3.5 VARIABILIDADE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS

Apesar da grande uniformidade e constância geral das características dos aços estes, por vezes, sofrem de pequenas alterações locais das suas propriedades mecânicas.

Estas variações devem-se sobretudo a pequenas diferenças na composição química do aço, ou a pequenas desigualdades no seu historial térmico e mecânico durante o processo de fabrico.

Na Figura 2.17 apresenta-se uma distribuição de propriedades mecânicas de 224 chapas de aço ASTM A285 adquiridas a 6 fornecedores distintos durante um período de 8 anos:

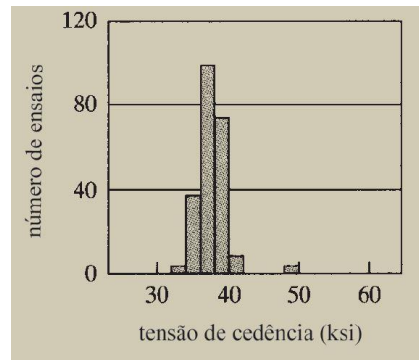


Figura 2.17 - Distribuição de propriedades mecânicas de 224 chapas de aço ASTM A285 [35]

Apesar do espectro de variação ser reduzido é fundamental ter em atenção esta variabilidade no controlo de qualidade do material e nas especificações de projeto.

## 2.4 EFEITOS DOS ELEMENTOS DE LIGA

### 2.4.1 O CARBONO

O ferro puro tem propriedades mecânicas pouco interessantes na medida em que tem excessiva ductilidade, é muito macio e possui uma baixa resistência a esforços. Contudo, a introdução de pequenas quantidades de carbono na composição altera radicalmente estas características. De fato, o teor de carbono nos aços raramente ultrapassa 2% (caso contrário tem-se ferro-fundido) em massa sendo que nos aços estruturais este valor decresce para os 0,3% [35].

De acordo com a Figura 2.18, um acréscimo do teor em carbono no aço leva ao aumento da dureza de Brinell e das tensões máximas de tração. Em contrapartida, o aumento do teor de carbono origina uma perda de ductilidade e maior fragilidade:

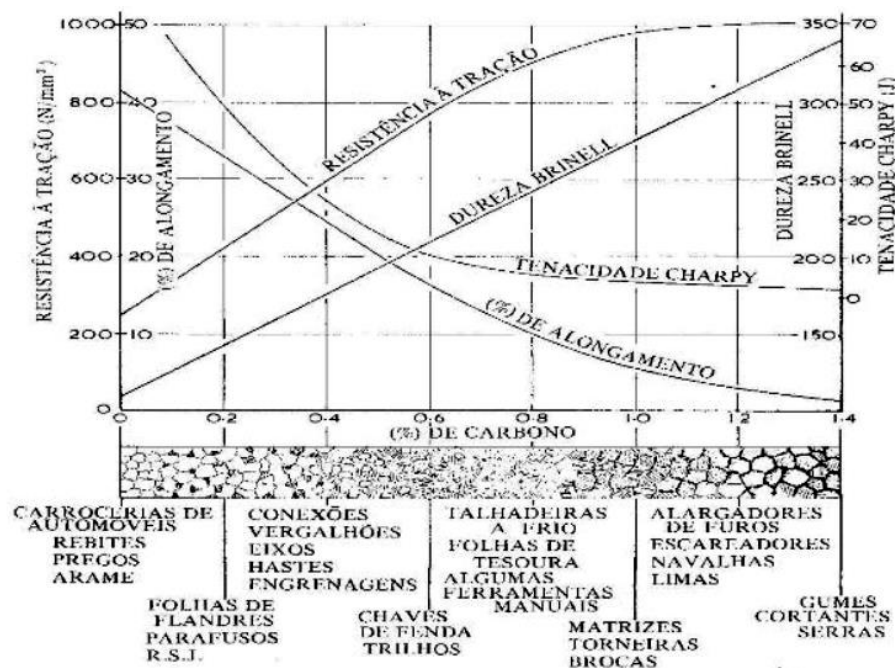


Figura 2.18 - Variação de propriedades do aço em função do teor de carbono [44]



Apesar de provocar uma diminuição da tenacidade, a presença do carbono nos aços introduz melhorias significativas das suas propriedades devido essencialmente a duas razões.

A primeira deve-se ao fato de os átomos de carbono serem 4,5 vezes mais leves que os átomos de ferro e 27 vezes menos volumosos. Isto faz com que a proporcionalidade atômica seja muito maior do que a proporcionalidade mássica, ou seja, um aço com 0,2% em percentagem mássica de carbono tem 1% em percentagem atômica.

A segunda está relacionada com o efeito que os átomos de carbono geram na estrutura cristalina do ferro. As estruturas cristalinas do ferro não são perfeitas e possuem defeitos naturais tais como lacunas, interstícios, limites de grão, etc. Dentro deste conjunto existe um defeito que tem influências dramáticas sobre as propriedades mecânicas de um material: são as deslocações (Figura 2.19).

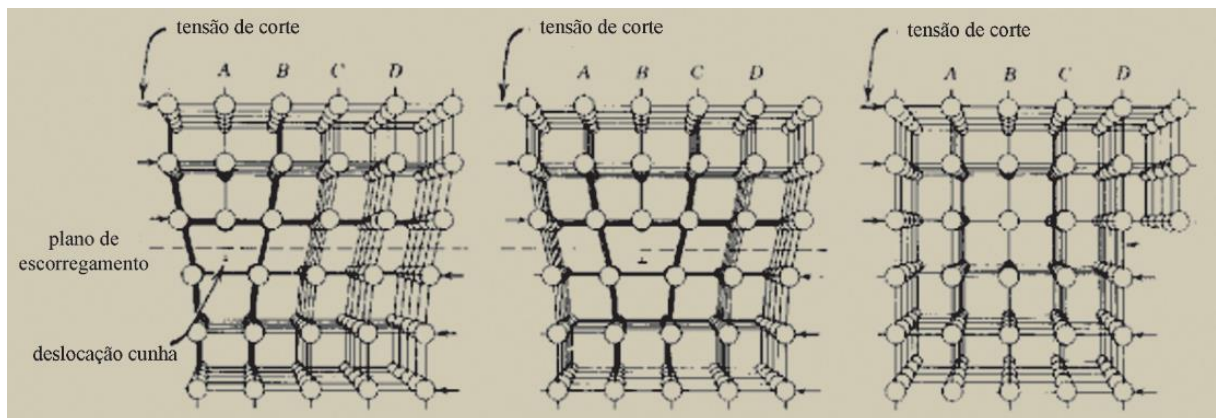


Figura 2.19 - Movimento de uma deslocação (cunha) num cristal cúbico [35]

As deslocações permitem o escorregamento e movimento entre átomos durante a deformação plástica. De forma geral são estas translações atômicas que definem e controlam a cedência (passagem do regime de deformação elástica para o regime de deformação plástica) e os mecanismos e o comportamento do material aquando a deformação plástica.

A passagem do domínio elástico para o domínio plástico é despoletada pelo início do aparecimento de movimentos das deslocações, isto é, quando há uma deslocação gera-se uma deformação plástica e irreversível. Quanto mais difícil for a ativação destes mecanismos maior será a tensão de cedência do material e, consequentemente, maior será a sua resistência.

Visto que os átomos de ferro são muito mais volumosos que os átomos de carbono, estes últimos podem ocupar os espaços vazios (interstícios) entre os átomos de ferro tornando-se obstáculos ao movimento das deslocações. Deste modo, a mobilidade das deslocações e a tensão de cedência será tanto maior quantos mais átomos de carbono existirem na estrutura cristalina do ferro. Este procedimento de introdução de carbono no ferro designa-se por endurecimento por solução sólida.

A estrutura cristalina cúbica de face centrada (CCC) do ferro (ferrite) é estável até cerca de 911 °C e, devido à sua configuração espacial, apenas consegue dissolver no máximo 0,025% de carbono. Caso se introduza mais carbono este decairá sob a forma de carboneto de ferro ou cementite ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) que é um material duro (6 a 7 na escala de Mohs [45]) e frágil e cuja precipitação no interior da matriz de ferrite

leva a um aumento da resistência mecânica (Figura 2.20). Esta segunda etapa designa-se por endurecimento por precipitação e permite, mais uma vez, aumentar a resistência mecânica e a dificuldade em deformar plasticamente o material.



Figura 2.20 - Cementite [46]

Ambas as fases, uma macia (ferrite, rica em ferro) e outra dura e frágil (cementite, mais rica em carbono) constituem a microestrutura bifásica do aço e assemelham-se a um material compósito, tal como se ilustra na Figura 2.21.

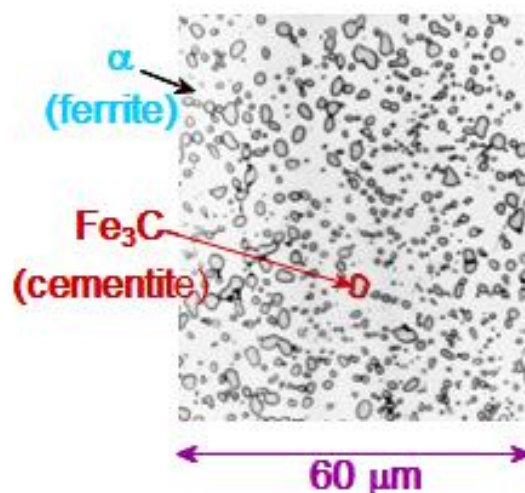


Figura 2.21 - Microestrutura bifásica do aço [47]



#### 2.4.2 OUTROS ELEMENTOS DE LIGA

Para além do carbono podem ser adicionados outros elementos químicos ao ferro por forma a se alterarem as propriedades do aço e/ou para se obterem determinadas características específicas.

Na constituição do aço existem dois grupos de elementos: os elementos que formam a matriz de ferro que confere tenacidade ao material e os elementos que, em conjunto com o carbono, formam os carbonetos de reforço mais duros e frágeis e que se dispersam na matriz de ferro.

Apesar do principal constituinte da matriz de um aço ser o ferro verificou-se que a incorporação de cobre (Cu), níquel (Ni) ou cobalto (Co) permitem melhorar determinadas propriedades específicas.

A adição de cobre até 0,8% nos aços de construção resulta num aumento de resistência à corrosão do material e numa alteração da tonalidade da superfície (que se torna acastanhada com o passar do tempo) que usualmente é aproveitada na estética das estruturas. O cobalto torna o aço mais refratário e resistente à temperatura (aumentando a temperatura de início de fusão) mas por outro lado reduz a tenacidade da matriz. O níquel tem um cargo importante nos aços inoxidáveis de construção soldada na medida em que expande o domínio austenítico na sua produção.

O manganês (Mn), o azoto (N), o silício (Si) e outros elementos de liga também podem ser dissolvidos em pequenas quantidades pela matriz ferrítica do aço por forma a contribuir para o seu endurecimento por solução sólida. Este endurecimento depende da diferença entre a dimensão e estrutura eletrónica dos átomos de soluto e dos átomos de solvente (ferro). Nas soluções sólidas diluídas o endurecimento causado pelos átomos de soluto é proporcional à sua concentração.

Uma distribuição aleatória destes átomos pela rede cristalina da solução sólida dificulta o movimento das deslocações e conseqüentemente provoca um aumento da tensão de cedência e resistência do material. No entanto, caso a instalação destes átomos se dê de forma mais localizada e em torno das deslocações daí se obteria uma maior estabilidade das mesmas e aumento substancial da tensão de cedência.

Através das equações semi-empíricas desenvolvidas na década de 50 por Gladman e Pickering é possível estimar a tensão de cedência ( $\sigma_{ced}$  ou  $f_y$ ), a tensão máxima uniforme ( $\sigma_{mu}$ ) e a temperatura de transição dúctil-frágil ( $TT_{dúctil-frágil}$ ) de um aço-carbono estrutural com base na sua composição química:

$$\sigma_{ced}(MPa) = 53,9 + 32,3\% Mn + 83,2\% Si + 354\% N + 17,4 d^{-0,5}$$

$$\sigma_{mu}(MPa) = 294 + 27,7\% Mn + 83,2\% Si + 3,85\% (perlite) + 17,4 d^{-0,5}$$

$$TT_{dúctil-frágil}(^{\circ}C) = -19 + 44\% Si + 100(\%N)1/2 + 2,2\% (perlite) - 11,5 d^{-0,5}$$

onde:

$Mn$  – manganês;

$Si$  – silício;

$N$  – azoto;

$d$  – tamanho do grão em mm;

*perlite* – definida em 2.5.

A quantidade e tipo de carbonetos de reforço existentes no aço depende não só do teor em carbono mas também da quantidade e tipo dos elementos de liga que a ele se ligam. Para além da cementite ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) os elementos carburígenos possuem características distintas e podem ser divididos em dois grupos:

- Os elementos formadores de carbonetos duros – tungsténio (W), molibdénio (Mo), vanádio (V) e nióbio (Nb);
- Os elementos de crómio (Cr).

O tungsténio e o molibdénio possuem a mesma função sendo que a sua escolha durante o processo de fabrico apenas recai no critério económico. Estes elementos dão origem ao carboneto  $\eta$  ( $\text{M}_6\text{C}$ ) constituído por (Fe, Mo, W) 6C em aços gerais mas em aços de tungsténio a sua composição varia entre  $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$  e  $\text{Fe}_4\text{W}_2\text{C}$ . Este carboneto é pouco solúvel na matriz austenítica pelo que o tungsténio e o molibdénio contribuem pouco para a temperabilidade do aço.

A adição de vanádio ou nióbio tem como objetivo produzir o carboneto MC. As suas partículas têm uma geometria angulosa e aumentam significativamente a resistência à abrasão dos aços já que possuem uma dureza bastante elevada. No entanto, o carboneto MC precipita nos limites de grão o que impede a coalescência de grão durante a austenitização (aumento do tamanho de grão). Isto possibilita a criação de aços com um grão mais fino o que permite aumentar sua tensão de cedência, tenacidade e soldabilidade.

No segundo grupo, a adição de crómio tem como objetivo promover a formação de carbonetos, aumentar a temperabilidade e a resistência à corrosão e retardar o envelhecimento durante o revenido.

Nos aços de construção o teor de crómio raramente excede 1% mas em aços de elevada resistência à corrosão (aços inoxidáveis) este valor costuma ser superior a 12%.

Durante o processo de fabrico do aço outros elementos químicos podem ser acrescentados à mistura visando obter determinados benefícios em detrimento de outros. Variando a qualidade e o teor destes elementos é possível alcançar produtos finais muito distintos e com propriedades muito diversificadas.

No Quadro 2.1 apresenta-se um conjunto de elementos químicos e respetivas funções genéricas nos aços.

Quadro 2.1 - Funções dos elementos de liga [48]

Elemento de liga	Função
Alumínio (Al)	Utilizado em pequenas porções como desoxidante e agente de controlo de crescimento dos grãos.
Chumbo (Pb)	Não se liga ao aço mas distribui-se na matriz sob a forma de partículas microscópicas facilitando a maquinabilidade
Cobalto (Co)	Aumenta a dureza do aço sob altas temperaturas
Cobre (Cu)	Melhora a resistência à corrosão atmosférica se adicionado em teores de 0,2 a 0,5%
Crómio (Cr)	Melhora a resistência à corrosão, à alta temperatura, ao desgaste, à tração (cerca de 80MPa por cada 1%) e facilita o processo de têmpera
Enxofre (S)	Na generalidade é um elemento indesejável já que combinado com o ferro dá origem ao sulfeto o que torna o aço quebradiço. Contudo, caso seja combinado com o manganês, este facilita a maquinabilidade
Fósforo (P)	É um elemento prejudicial resultante do processo de fabrico. Como torna o aço frágil os seus teores têm de ser convenientemente controlados
Manganês (Mn)	Melhora a resistência à tração (em média 100MPa por cada 1%) e aumenta a dureza dos aços após o processo de têmpera
Molibdénio (Mo)	Melhora a resistência a altas temperaturas e ao desgaste e aumenta a dureza após a têmpera. Em aços inoxidáveis melhora a resistência à corrosão
Níquel (Ni)	Aumenta o limite de elasticidade e melhora a resistência à tração (cerca de 40MPa por cada 1%). Amplia significativamente a capacidade de têmpera pois reduz a velocidade de arrefecimento. Altera a alotropia do ferro e para teores acima de 25% permite reter a fase austenite a temperaturas usuais o que origina um aço austenítico, não magnético, bastante resistente à corrosão
Silício (Si)	Agente desoxidante durante o fabrico. Aumenta a resistividade elétrica e melhora a resistência à corrosão e tração mas prejudica a soldabilidade
Tungsténio (W)	Forma carbonetos bastante duros e melhora a resistência à tração a altas temperaturas
Vanádio (V)	Refina a estrutura do aço prevenindo o crescimento dos grãos. Dá origem a carbonetos duros e estáveis e permite aumentar a capacidade de corte e dureza a altas temperaturas

## 2.5 MICROESTRUTURA

Conforme a sua composição química, os aços quando submetidos a diferentes temperaturas apresentam diversas microestruturas às quais correspondem diferentes propriedades mecânicas. No total, o aço possui seis tipos de microestruturas: a ferrite, a austenite, a cementite, a perlite, a martensite e a bainite. As primeiras três foram já introduzidas anteriormente sendo que agora se segue a explicação da formação da perlite e no subcapítulo seguinte a formação da martensite e bainite [35].

Um método utilizado para analisar as alterações da microestrutura é recorrendo a diagramas de fase, nomeadamente o diagrama de fase ferro-carbono (Figura 2.22).

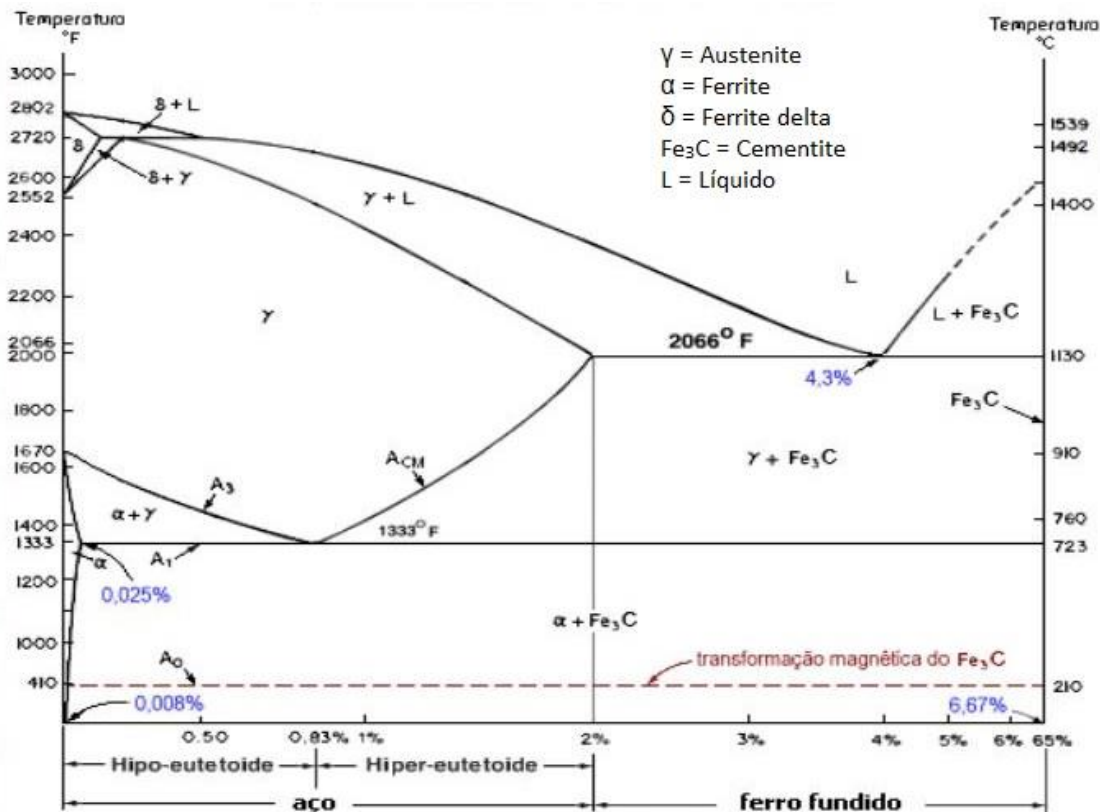


Figura 2.22 - Diagrama de fase ferro-carbono [44]

A 912 °C o ferro sofre uma transformação onde altera a sua estrutura cristalina de corpo centrado (CCC) para uma estrutura cristalina de faces centradas (CFC) designada por austenite ( $\gamma$ ). Esta fase permite absorver até 2% de carbono numa relação quase 100 vezes superior em relação à ferrite ( $\alpha$ ).

Assim, num aço que tenha, por exemplo, um teor de carbono de 0,5% e que seja aquecido até 1000 °C, todo o carboneto desaparece da microestrutura visto que o carbono é dissolvido pela austenite ( $\gamma$ ). Seguindo-se o seu arrefecimento lento e sofrendo as alterações previstas na figura anterior, o aço, a cerca de 750 °C, entra no domínio bifásico austenito-ferrítico ( $\alpha + \gamma$ ) onde surge a ferrite.

Continuando o arrefecimento, a 727 °C, a austenite persistente desaparecerá transformando-se em ferrite e cementite ( $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ ). Esta modificação da microestrutura interna do aço devida ao seu arrefecimento (alterando-se de austenite para ferrite e cementite) designa-se por transformação eutectóide e origina uma microestrutura característica formada por lamelas de cementite e ferrite mais conhecida por perlite (Figura 2.23).

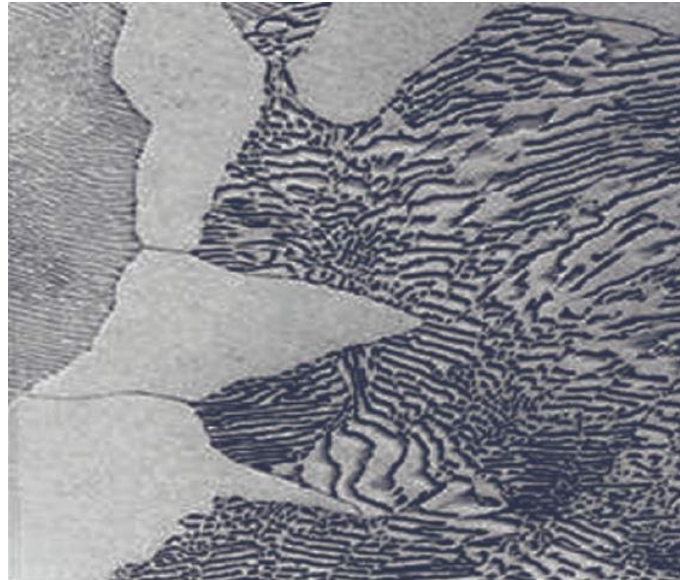


Figura 2.23 - Perlite de um aço Fe-0,5%C arrefecido lentamente desde o domínio austenítico [35]

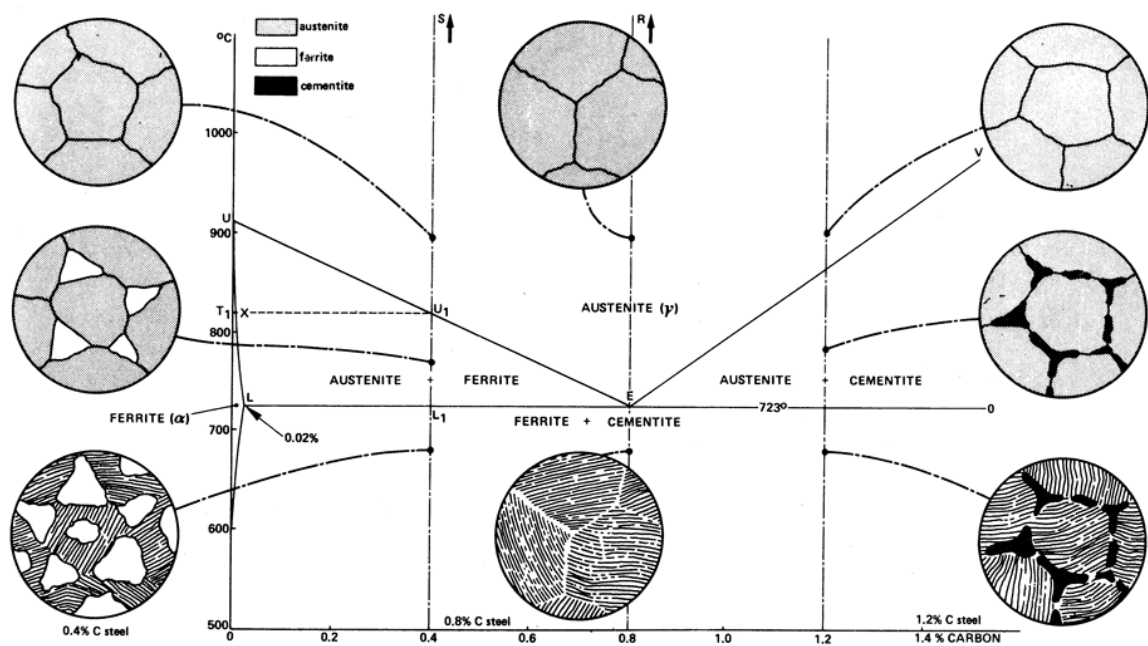


Figura 2.24 - Transformação da microestrutura do aço em função da temperatura e do teor em carbono [49]

Em aços com teores de carbono até 0,8% (aços de construção) arrefecidos lentamente, a proporção de perlite aumenta linearmente com o teor de carbono havendo uma tendência para o aumento da tensão de cedência.

## 2.6 OTIMIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS

Através de tratamentos térmicos e mecânicos é possível conferir outras características aos aços antes da sua utilização e aplicação final. Estas propriedades dependem não só da composição química do aço (mencionado anteriormente) mas também do historial térmico e mecânico obtido nesta etapa. Contudo, nem sempre estes tratamentos trazem benefícios. Como Filho refere [50], a aplicação de um tratamento térmico a um aço para melhoria de uma ou mais propriedades é conseguida com prejuízo de outra. Por exemplo, o aumento da dureza ou da resistência à tração tem como contrapartida a redução de ductilidade.

De forma geral estes tratamentos podem ser mecânicos, termomecânicos, térmicos, termoquímicos e superficiais e têm como objetivo reduzir/eliminar tensões internas, aumentar ou diminuir a dureza, melhorar a ductilidade, aumentar a resistência à tração e ao desgaste, melhorar a resistência à corrosão e altas temperaturas e atribuir propriedades elétricas e magnéticas [51].

### 2.6.1 TRATAMENTOS MECÂNICOS E TERMOMECÂNICOS

Os diversos tratamentos mecânicos (aplicados à temperatura ambiente) e termomecânicos (realizados a temperaturas elevadas) têm como principal objetivo conferir aos elementos de aço a forma pretendida para utilização e melhorar as suas propriedades mecânicas, nomeadamente, a tensão de cedência, através de uma reorganização da estrutura metálica originada por uma imposição de deformações permanentes.

Estas deformações ocorrem quando se dá o início do movimento dos átomos através das deslocações resultante de uma ultrapassagem da sua tensão de cedência quando sujeitos a forças cada vez maiores. À medida que a deformação plástica continua (com o contínuo aumento de carga) a densidade destas deslocações aumenta e o seu movimento torna-se sucessivamente mais difícil devido ao aumento de interação entre as mesmas. Daqui resulta que a deformação plástica dos aços não ocorra a tensão constante à temperatura ambiente, ou seja, o aço sofre um endurecimento por deformação plástica [35].

Este fenómeno permite que a resistência mecânica do aço possa ser aumentada através de uma pré-deformação acima do limiar de cedência. Assim, a tensão de cedência do material deixa de ser a original e passa a ser a tensão máxima atingida na deformação anterior. Este método também é conhecido por pré-deformação ou pré-esforço. No entanto, este tratamento, em contrapartida, leva a uma diminuição da tenacidade (menos capacidade de absorção de energia aquando impactos violentos) e sob altas temperaturas o aço recristaliza (a rede de deslocações criada durante a deformação plástica é eliminada) o que conduz a um decréscimo da tensão de cedência para o seu valor original. Uma consequência importante deste fato é a difícil soldabilidade dos aços pré-esforçados na medida em que ocorre amaciamento (decréscimo das propriedades mecânicas) na vizinhança da soldadura.

Os tratamentos mais vulgarmente utilizados na atualidade englobam a laminagem, a estiragem, a trefilagem e a torção.

#### 2.6.1.1 Laminagem

A laminagem é um processo que visa essencialmente alterar os billetes ou lingotes de aço para outras formas e dimensões, nomeadamente, perfis, chapas, fios e varões. Este método consiste na passagem forçada do aço original por várias máquinas (usualmente cilindros), que lhes aplicam uma força transversal de compressão, até se obter a forma final desejada (Figura 2.25) [51].

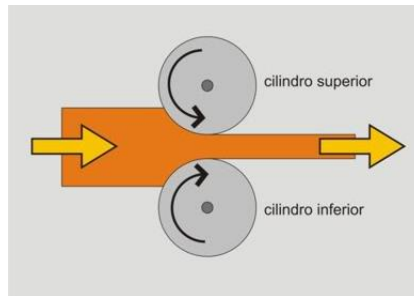


Figura 2.25 - Processo de laminagem por cilindros [52]

A laminagem pode ser executada a quente, onde a temperatura de trabalho é superior à de recristalização mas inferior à de fusão, ou a frio onde a temperatura é inferior à temperatura de recristalização. O primeiro caso torna o processo mais eficiente em comparação com a laminagem a frio na medida em que é possível utilizar forças de compressão menores e permite reduzir as tensões internas finais [45].

#### 2.6.1.2 Estiragem

A estiragem é uma operação que consiste em aplicar uma força de tração aos elementos de aço causando o aumento do seu comprimento e a diminuição da sua seção. Este processo permite a obtenção de componentes com bom comportamento mecânico (endurecimento por deformação plástica) mas detém o inconveniente das peças não ficarem homogêneas tanto na sua dimensão como no alongamento que tiveram resultando em variações de seção e consequente heterogeneidade de propriedades mecânicas [51].

#### 2.6.1.3 Trefilagem

A trefilagem é um método que se baseia tanto na laminagem como na estiragem. As peças são forçadas a atravessar orifícios de moldagem, as fieiras, onde reduzem a sua seção e aumentam de comprimento. Simultaneamente é aplicada uma força de tração nos elementos à medida que estes saem das fieiras (Figura 2.26 e Figura 2.27) [51]. Em comparação com a estiragem o produto final é mais homogêneo no seu comportamento mecânico pelo que é mais eficaz o seu controlo de qualidade. Deste processo resultam componentes de aço estruturais tais como as armaduras de pré-esforço [45].



Figura 2.26 - Processo de trefilagem [51]





Figura 2.27 - Fieiras para trefilagem [53]

#### 2.6.1.4 Torção

O processo de torção além de aplicar uma força de tração aos elementos (partilhando as vantagens da trefilagem) aplica uma força de torção por forma a alterar as geometrias longitudinalmente e a aumentar a aderência [45].

#### 2.6.2 TRATAMENTOS TÉRMICOS

Os tratamentos térmicos são definidos por um conjunto de operações que envolvem o aquecimento e arrefecimento do aço no estado sólido (sem alteração da sua composição química) com o fim de se obter uma determinada microestrutura interna que resulta na alteração de um determinado conjunto de propriedades (mecânicas ou outras). De forma geral existem quatro tipos de tratamentos térmicos: o recozimento, a normalização, a têmpera e o revenido [35]. Na Figura 2.28 expõe-se um diagrama de equilíbrio do aço onde se representa as gamas de temperatura no qual se processam os diferentes tratamentos térmicos em função do teor de carbono.

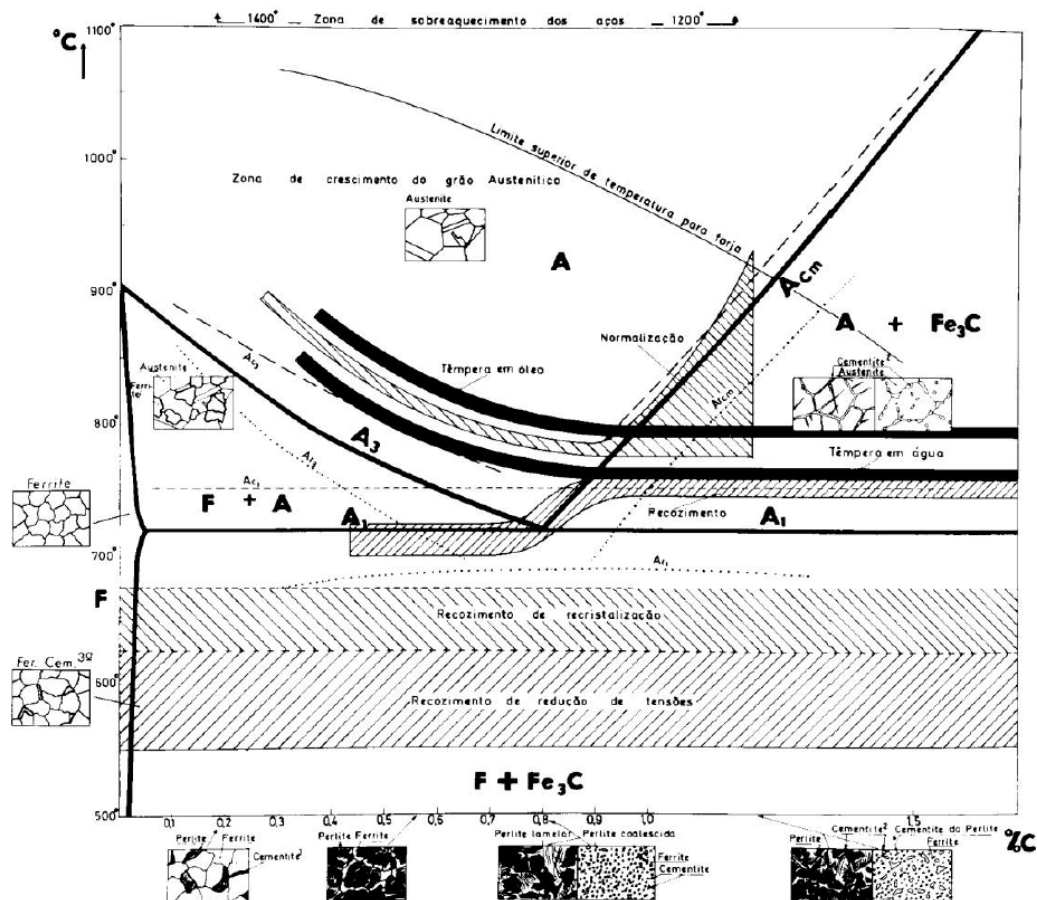


Figura 2.28 - Tratamentos térmicos em função da temperatura e teor de carbono [54]



### 2.6.2.1 Recozimento

O recozimento é um processo que tem como objetivo devolver ao aço as características que foram alteradas durante o tratamento mecânico ou térmico aplicado anteriormente. Permite regularizar as estruturas brutas decorrentes da fusão (transformando-as em estruturas mais recetíveis à maquinabilidade ou à deformação a frio), atenuar heterogeneidades e reduzir/eliminar tensões internas consequentes do seu fabrico.

Esta operação reside num aquecimento uniforme das peças, mantendo-se a temperatura constante durante um tempo pré-definido, seguindo-se um arrefecimento lento das mesmas até à temperatura ambiente. O arrefecimento deve ser o mais uniforme e lento possível de modo a permitir uma gradual e completa transformação da estrutura final do aço [45].

### 2.6.2.2 Normalização

A operação de normalização é semelhante ao recozimento distinguindo-se pelo fato de o aço ser aquecido a uma temperatura superior e o seu arrefecimento até à temperatura ambiente ser realizado ao ar, sendo portanto mais célere. Este tratamento pretende recuperar as características iniciais do aço antes de qualquer tratamento térmico ou mecânico. Elimina-se irregularidades estruturais e tensões internas e obtém-se uma estrutura granular mais fina do que a obtida por recozimento.

### 2.6.2.3 Têmpera

A têmpera tem por base o aquecimento do aço até à temperatura de austenitização (cerca de 1000 °C) seguindo-se o seu arrefecimento rápido até à temperatura ambiente através, por exemplo, da imersão em água, óleo, ou banho de sais. Este procedimento impede que o carbono no interior do aço tenha tempo para precipitar pelo que este fica cativo na rede cristalina do ferro, distorcendo-a. Esta fase, com a estrutura cristalina distorcida, designa-se por martensite (Figura 2.29) e confere à peça características mecânicas elevadas a nível de dureza e tensão de cedência mas com efeitos negativos na tenacidade.



Figura 2.29 - Martensite [55]

Para que se forme a martensite é necessário que a taxa de arrefecimento do aço seja superior a uma taxa crítica (que depende da composição química) e cuja informação se encontra nos diagramas tempo, temperatura e transformação (TTT), como ilustrado na Figura 2.30 [35].

De forma simplificada, estes diagramas são compostos por duas curvas em “C” e por duas linhas horizontais. As primeiras indicam o início e o fim das transformações difusivas (que dão origem às fases de equilíbrio: ferrite e carbonetos) enquanto as últimas representam as temperaturas de início e fim da transformação martensítica (designadas por  $M_s$  e  $M_f$  respetivamente). Durante a têmpera dos aços o arrefecimento tem de ser de tal forma rápida para que as curvas “C” não sejam intercetadas pelas curvas de arrefecimento. O nível de temperabilidade do aço depende da posição das curvas “C”: quanto mais para a direita no diagrama TTT estiverem posicionadas mais fácil é têmpera do aço.

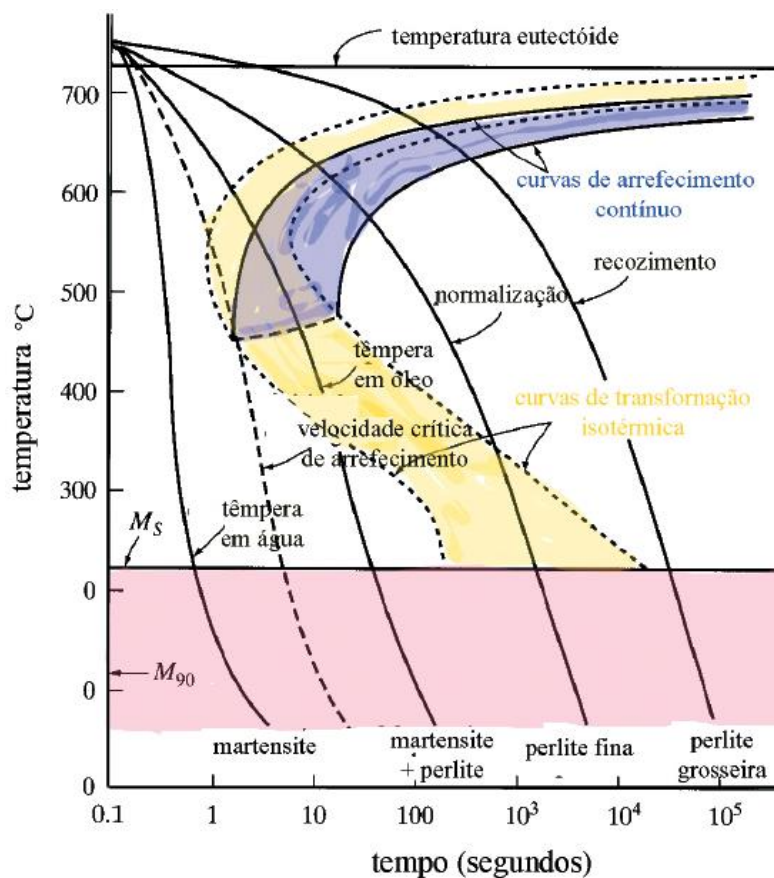


Figura 2.30 - Diagrama TTT de um aço Fe-0,8%C [35]

Na composição do aço os elementos de liga podem dividir-se em alfacéneos e gamagéneos conforme expandem o domínio ferrítico ou austenítico respetivamente. Com a exceção do manganês todos os elementos carburígenos são alfacéneos enquanto o carbono e todos os elementos formadores da matriz são gamagéneos. É o balanço entre estes dois conjuntos e o teor de carbono que ditam as temperaturas  $M_s$  e  $M_f$ , a temperabilidade e a quantidade e tipo de carbonetos presentes (que surgem tanto durante a solidificação e arrefecimento, tanto em tratamentos térmicos como o recozimento ou revenido).

O nível de temperabilidade do aço aumenta com todos os elementos de liga (exceto com o cobalto) e é afetada de forma decrescente pela seguinte ordem: carbono, vanádio, molibdênio, crômio, manganês, silício, cobre e níquel.

A quantidade de martensite obtida após a têmpera depende da temperatura  $M_s$  característica do aço sendo a mesma diminuída por todos os elementos de liga.

A dureza da martensite é tanto maior quanto maior for o teor em carbono e a sua morfologia está igualmente dependente do mesmo. A martensite de baixo teor em carbono (usualmente maior que 0,5%) designa-se por martensite em ripas enquanto a martensite acicular é associada à martensite de médio/alto teor em carbono (Figura 2.31).

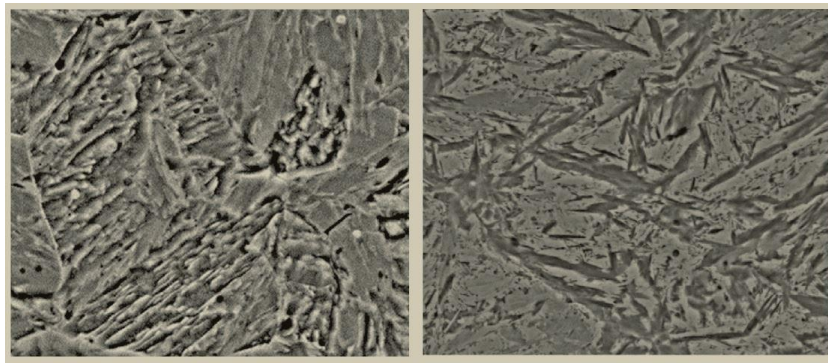


Figura 2.31 - Tipos de martensite. À esquerda a martensite em ripas e à direita a martensite acicular (ampliado 2000 vezes) [35]

Se as condições forem apropriadas (arrefecimento rápido de  $10^3$  a  $10^4$  segundos desde temperaturas entre 200 a 540 °C) pode-se formar, entre a martensite e a perlite, uma microestrutura acicular designada por bainite (Figura 2.32).

Esta tem propriedades mecânicas bastante variáveis entre a martensite e a perlite e pode ser decomposta em dois tipos: a bainite inferior e a bainite superior. A sua dureza é tanto maior quanto menor for a temperatura a que se forma, sendo a bainite inferior mais dura que a bainite superior, que por sua vez tem uma dureza superior à perlite.

A dureza da bainite deve-se à formação de grãos cada vez maiores com a diminuição da temperatura, aumentando o teor de carbono e a quantidade de carbonetos retidos [45].

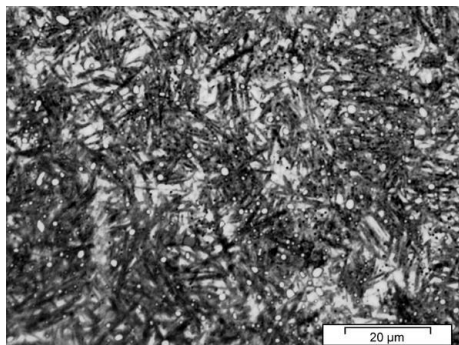


Figura 2.32 – Bainite [56]

#### 2.6.2.4 Revenido

O revenido é o último tratamento térmico que se aplica aos aços. Consiste no aquecimento deste a temperaturas entre 300 e 550 °C (dependendo da composição do aço) com o objetivo de eliminar a austenite residual, que surge caso a temperatura  $M_f$  seja inferior à temperatura ambiente (Figura 2.33). Permite eliminar tensões internas, corrigir durezas excessivas e, naturalmente, reduzir a fragilidade e aumentar a ductilidade [35].

Durante este processo os elementos de liga particionam-se novamente o que leva à precipitação de carbonetos de liga extremamente finos na martensite. Isto usualmente conduz a uma diminuição da dureza do material e a um aumento da sua tenacidade (Figura 2.34).

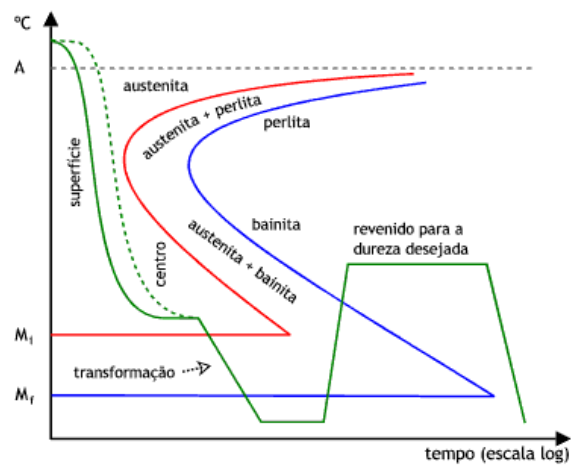


Figura 2.33 - Diagrama TTT de uma têmpera seguindo-se um revenido [48]

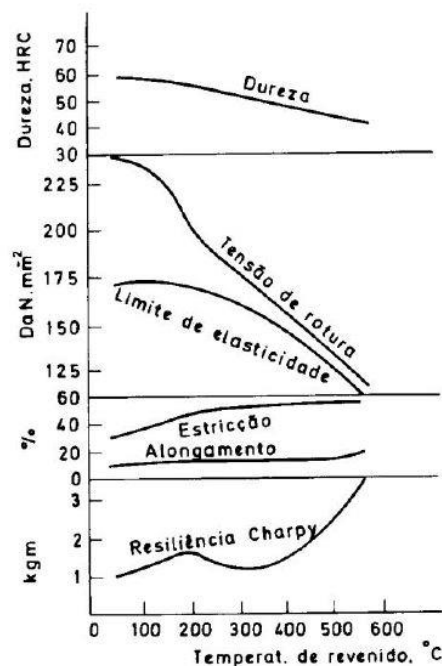


Figura 2.34 - Exemplo da variação das características do aço em função da temperatura de revenido [54]

Contudo, para temperaturas até 500 °C, os materiais com teores de crômio superiores a 8% não sofrem redução da dureza. Esta oposição é devido à precipitação do carboneto  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ . Por outro lado, adições de vanádio e molibdênio permitem aumentar a resistência ao revenido do aço. Esta resistência ao revenido dos aços é útil quando se tratam de aplicações em que haja uma grande probabilidade de se atingirem temperaturas elevadas em serviço.

#### 2.6.3 TRATAMENTOS TERMOQUÍMICOS

Estes tratamentos são realizados através de processos térmicos e químicos com o objetivo de modificar a composição química das películas superficiais dos aços [51].

#### 2.6.4 TRATAMENTOS SUPERFICIAIS

Os tratamentos superficiais são processos finais que originam depósitos nos aços por forma a atribuir determinadas características e a melhorar as suas qualidades superficiais tendo em atenção as características finais necessárias para a sua utilização [51].

### 2.7 CONSTRUÇÃO SOLDADA

A construção soldada constitui um dos principais métodos que os engenheiros civis dispõem para unir componentes de aço. O princípio da soldadura baseia-se na ligação de componentes através de uma fusão executada na zona de união. A solidificação posterior origina a eliminação da descontinuidade das duas superfícies, de onde resulta a união efetiva dos componentes [35].

Os procedimentos mais comuns de soldadura de aços para estruturas de construção civil são a soldadura por arco elétrico ou pela imposição de um potencial elétrico entre dois polos (pinças) colocados entre as peças a unir (soldadura por resistência). Em ambos os processos a dissipação da energia elétrica pelo material resulta no aumento da sua temperatura de onde ocorre uma fusão localizada na zona de passagem de corrente.

Alguns processos de soldadura, nomeadamente a realizada por meio de arco elétrico, podem também incluir a adição de uma outra liga metálica com o objetivo de alterar localmente as propriedades do cordão de soldadura por forma a aumentar a soldabilidade do par.

Durante a soldagem a fusão do aço é localizada a partir do qual se estabelece um gradiente térmico entre a zona fundida (banho fundido), cuja temperatura é superior à temperatura de fusão, e as zonas do componente mais afastadas do banho, que se encontram a temperaturas inferiores. Geralmente, o volume do banho de fusão é pequeno quando comparado com o volume das peças a soldar e visto que estes são metais, a sua condutividade térmica permite uma grande dissipação de calor pela massa dos componentes. Com efeito, a taxa de arrefecimento dos aços aquando a soldadura é bastante elevada, tipicamente entre  $10^2$  e  $10^5$  °C/seg.

Temperaturas superiores à de fusão, gradientes térmicos e taxas de arrefecimento elevadas resultam, inevitavelmente, na alteração das características microestruturais do aço (e consequentemente das suas propriedades) na vizinhança do cordão de soldadura. Estas modificações são condicionadas principalmente pela composição do aço, história térmica e mecânica e pelo processo e parâmetros de soldadura utilizados. De forma semelhante, os ciclos de aquecimento e arrefecimento durante a soldadura provocam contrações e dilatações nas peças, originadas pelas variações térmicas e pelas transformações de



fase que o aço pode sofrer entre a temperatura ambiente e de fusão. Daqui também podem resultar empenos da estrutura, fragilizações e/ou fissurações da junta soldada.

A observação em corte transversal de uma junta soldada de aço (Figura 2.35) permite identificar três zonas gerais distintas: a zona constituída pelo material base (MB), a zona termicamente afetada (ZTA), onde apenas ocorrem reações no estado sólido, ou seja onde a temperatura variou entre a temperatura ambiente e a temperatura de fusão do aço, e a zona fundida onde foi excedida a temperatura de fusão do aço (ZF).

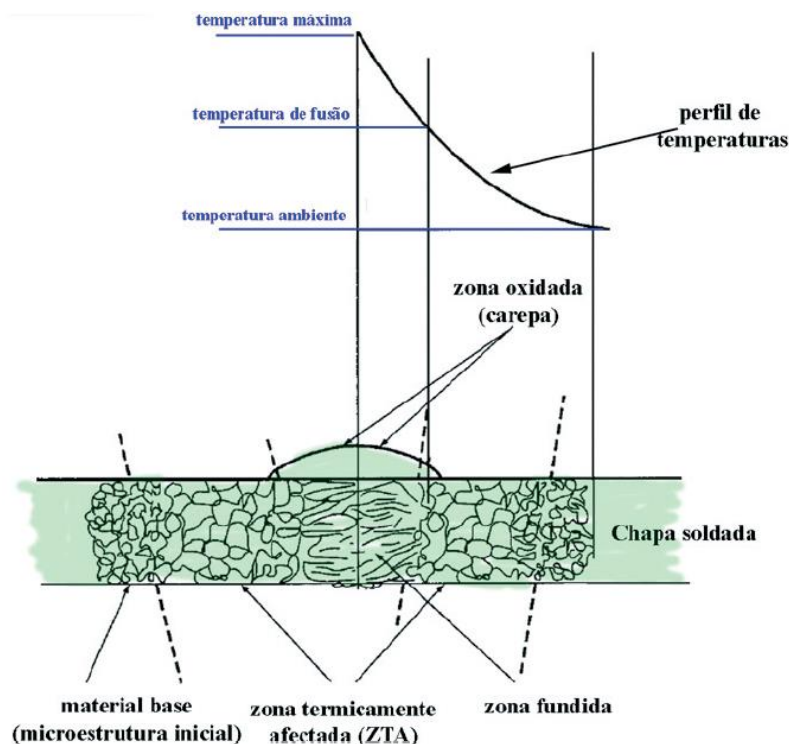


Figura 2.35 - Esquema de um cordão de soldadura em corte transversal onde se apresenta a zona fundida (ZF), a zona termicamente afetada (ZTA) e o material base (MB) [35]

Na ZTA, mesmo que no processo de soldadura seja empregue um material de adição, a composição original do material não é alterada. Contudo, podem ocorrer diversas modificações microestruturais onde três casos particulares deverão ser tidos em conta aquando a seleção do aço para soldadura:

- A precipitação de compostos intermetálicos (usualmente carbonetos) com consequente redução local do teor de elementos de liga em solução sólida na matriz;
- Coalescência de grão/recristalização. O aumento do tamanho de grão implica sempre uma redução da tenacidade do material que pode originar rotura frágil sob variações súbitas das condições de carga (impactos) ou térmicas. A adição de pequenas quantidades de titânio, nióbio ou vanádio permitem estabilizar o tamanho de grão melhorando a soldabilidade do material. Essa é uma das vantagens da utilização de aços microligados com estes elementos para construção de estruturas de apoio ou suporte soldadas;

- O aquecimento acima da temperatura de austenitização seguindo-se uma taxa rápida de arrefecimento poderá resultar na formação de martensite. Sendo esta última uma fase dura mas frágil, a sua formação na ZTA conduz inevitavelmente à fragilização da junta nessa zona (geralmente designada por fissuração a frio). O aparecimento de martensite pode ser minimizado pela seleção de um aço com um teor em carbono inferior a cerca de 0,25%, ou em alternativa, pela submissão da peça a soldar a um pré ou pós-aquecimento por forma a evitar as taxas de arrefecimento elevadas durante a soldadura.

A microestrutura da ZF depende do material e das condições de processamento. É normalmente uma microestrutura formada por grãos finos e alongados, designada por estrutura colunar-dendrítica ou colunar-celular.

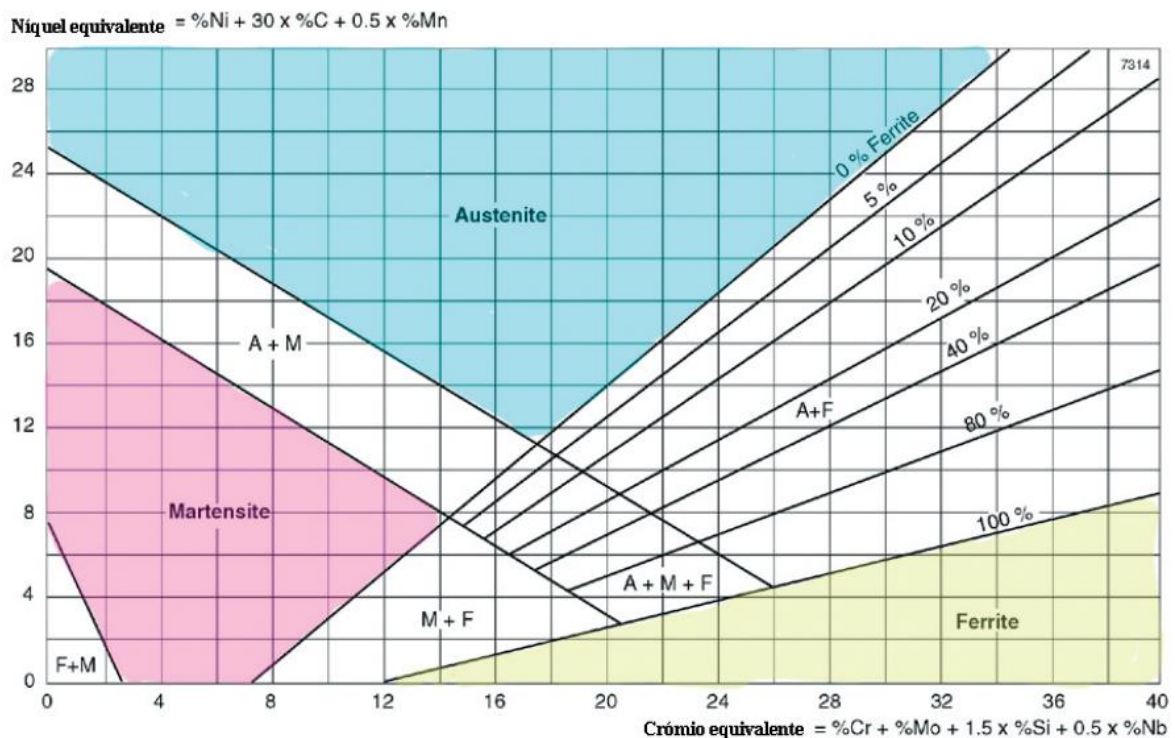


Figura 2.36 - Diagrama de Schaeffler [35]

As fases presentes nesta zona não correspondem obrigatoriamente às mesmas que o material apresentava antes do processo de soldadura, uma vez que as condições de solidificação são relativamente drásticas. A previsão das fases presentes na junta soldada (que naturalmente possuem implicações sobre as propriedades da junta) pode ser realizada através do diagrama de Schaeffler, apresentado na Figura 2.36. Neste diagrama a composição do aço é transformada em equivalentes de níquel e em equivalentes de crômio, que permitem definir um ponto no diagrama ao qual corresponde um determinado tipo de estrutura. Por norma evita-se sempre a formação de estruturas martensíticas ou ferríticas que possam conduzir à fragilização da junta.

Importa referir também outro aspeto importante sobre a ZF: dado que a solidificação se inicia sobre o material sólido da ZTA (mais frio) terminando próximo do plano central da junta onde as duas frentes de solidificação se encontram, é nesta região que se tendem a concentrar elementos com temperaturas

mais baixas de fusão que eventualmente façam parte da composição do aço, em particular o enxofre e o fósforo. Deste modo, a presença destes elementos reduz consideravelmente a soldabilidade dos aços na medida em que podem originar a formação de filmes frágeis de sulfuretos ou fosforetos e consequente fissuração da junta soldada (habitualmente designada por fissuração a quente).

A soldabilidade corresponde ao termo que designa a maior ou menor facilidade com que se consegue soldar um determinado tipo de aço. É um conceito difuso, de difícil quantificação e que envolve os diferentes aspetos mencionados anteriormente (além de outros como a alteração da resistência à corrosão ou fragilização pelo hidrogénio).

De uma forma geral pode-se assumir que a soldabilidade de um aço diminui à medida que o teor de carbono aumenta. Um método frequente e simples de estimar a soldabilidade de um aço e, em particular, a influência dos vários elementos de liga, é recorrendo ao conceito de carbono equivalente (CE) definido como:

$$CE = \%C + \frac{1}{6}(\%Mn) + \frac{1}{5}(\%Cr + \%Mo + \%V) + \frac{1}{15}(\%Cu + \%Ni)$$

Para que um aço seja considerado como “soldável em obra”, sem recurso a precauções especiais, o valor de CE não deverá exceder 0,25%. Caso seja superior, as condições de arrefecimento deverão ser controladas, bem como o metal de adição e o método de soldadura, que deverão ser criteriosamente selecionados de modo a evitar possibilidades de fissuração ou fragilização da estrutura.

É importante referir também que o processo de soldagem pode ter influência na resistência à fadiga do componente devido à eventual formação de microfissuras, porosidades ou pequenas inclusões de escória no cordão de soldadura. Assim, é indispensável a submissão de elementos estruturais soldados a um rigoroso controlo de qualidade das juntas. Para além da inspeção macroscópica (por exemplo com recurso a ensaios líquidos penetrantes), a possibilidade da existência de defeitos de soldadura subsuperficiais, obriga ao recurso a ensaios de ultrassons e de radiografia às juntas soldadas.

Por fim, caso o procedimento de soldadura seja realizado criteriosamente de acordo com o exposto, a sua escolha integra um método de união simples, pouco oneroso e tão ou mais eficaz que qualquer outro processo, nomeadamente quando comparado com a construção rebitada.

## 2.8 PRODUÇÃO DO AÇO

A produção do aço consiste na transformação da matéria-prima (minério de ferro ou sucata) em aço líquido sendo este vazado de forma contínua por forma a criar os lingotes de aço ou outros produtos semi-acabados. Conforme o tipo de matéria-prima seja minério de ferro ou a sucata utiliza-se métodos de produção distintos, nomeadamente o alto-forno ou o forno de arco elétrico respetivamente.



### 2.8.1 ALTO-FORNO

Utilizados desde o século XIV os altos-fornos continuam a ser o processo mais comum para a obtenção da gusa (aço líquido) a partir do minério de ferro (Figura 2.37).

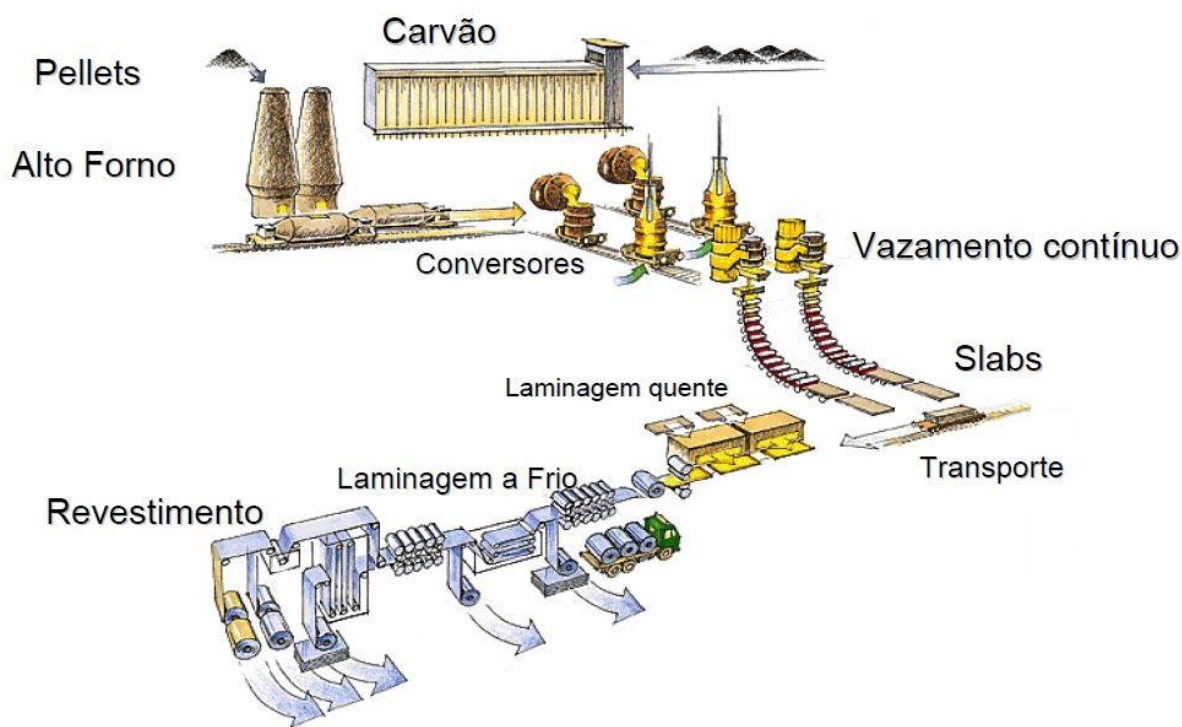


Figura 2.37 - Esquema de fabricação de aço pelo alto-forno [57]

Numa primeira fase procede-se à coqueificação e à preparação do minério de ferro. A coqueificação é o procedimento através do qual forma o coque, um combustível obtido pelo aquecimento da hulha (carvão mineral ou betuminoso) num recipiente fechado e sem combustão. Atualmente o coque (Figura 2.38) substitui o carvão de madeira/vegetal (mais utilizado antigamente) já que este último é mais caro e menos resistente ao esmagamento [57].



Figura 2.38 - Coque metalúrgico [58]

A preparação do minério de ferro envolve a redução e a separação deste dando origem aos “pellets”.

De seguida, o alto-forno é carregado, na zona superior, por camadas sucessivas e alternadas de coque, minério e fundente (usualmente calcário) cuja função é reagir com as cinzas do carvão e as impurezas do minério dando origem à escória (Figura 2.39).

No alto-forno as temperaturas de trabalho são crescentes de cima para baixo, na zona superior atinge-se cerca de 200 °C e na zona inferior (designada por cadinho) pode-se chegar a cerca de 1600 °C. É no cadinho que se deposita o produto imediato da redução do minério de ferro pelo coque, a gusa. No topo desta acumula-se a escória (impurezas) que através da uma sangria pode ser retirada e aproveitada para outros produtos como por exemplo o fabrico de cimentos ou isolantes térmicos.

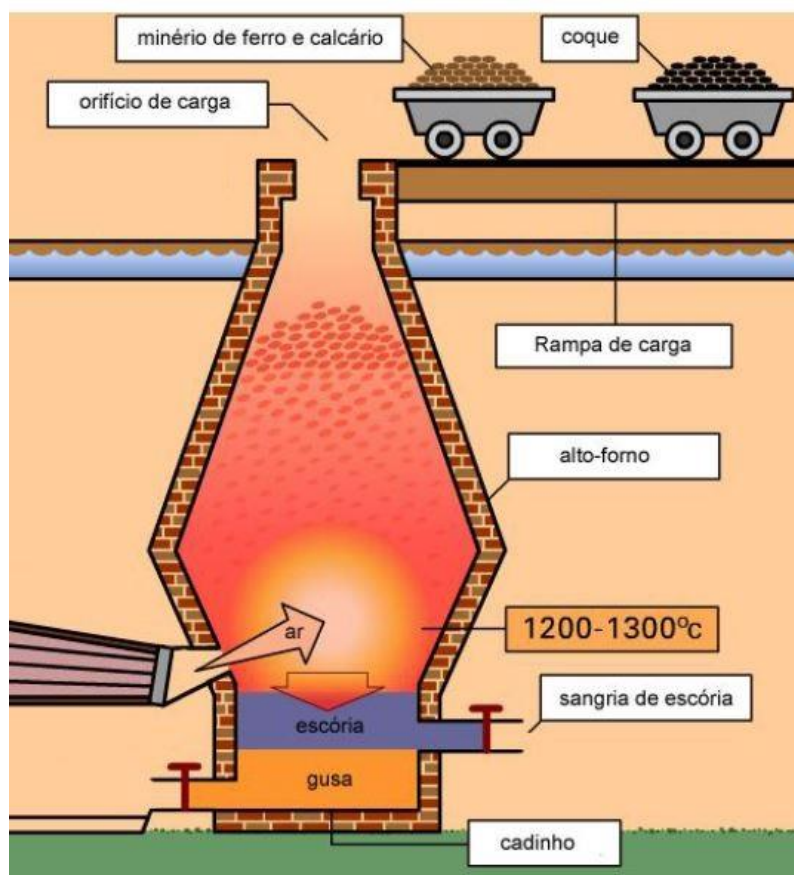


Figura 2.39 - Esquema simplificado do funcionamento de um alto-forno (adaptado) [59]

Por fim, a gusa é vazada para os vagões de transporte (designados por carros torpedo - Figura 2.40) e é carregada para a siderurgia onde é colocada nos misturadores cilíndricos e basculantes por forma a se combinarem com gusas provenientes de outros altos-fornos. Esta fase permite homogeneizar propriedades e características para grandes quantidades de aço.



Figura 2.40 - Carro torpedo [60]

Nos misturadores também se procede à dessulfuração da gusa (eliminação de grande parte do enxofre presente) através da adição de manganês. De seguida a gusa é transferida para os convertidores, local onde se realiza a afinagem. Esta operação envolve a eliminação de impurezas através da oxidação (tais como o silício, manganês, fósforo, etc.) e a limitação da percentagem de carbono (Figura 2.41). Após a afinagem é adicionada à gusa os vários elementos químicos que se pretendem que façam parte da constituição do aço.

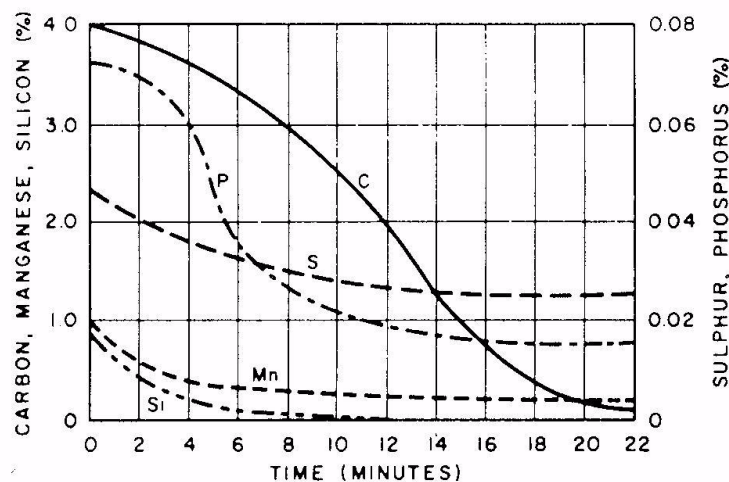


Figura 2.41 - Evolução da afinção de uma gusa num convertidor [61]

Ao sair dos convertidores o aço, já formado mas ainda líquido, passa pelo processo de obtenção dos lingotes, que poderá ser convencional ou contínuo. No primeiro o aço é vazado em lingoteiras individuais nas quais se formam os lingotes, como se observa na Figura 2.42.



Figura 2.42 - Lingotes com aço líquido [62]

No último o aço é vazado de forma contínua numa lingoteira aberta em ambas as extremidades, com um arrefecimento rápido que distribui o aço líquido uniformemente nos veios de lingotamento, para formar produtos semi-acabados – “slabs” (Figura 2.43).

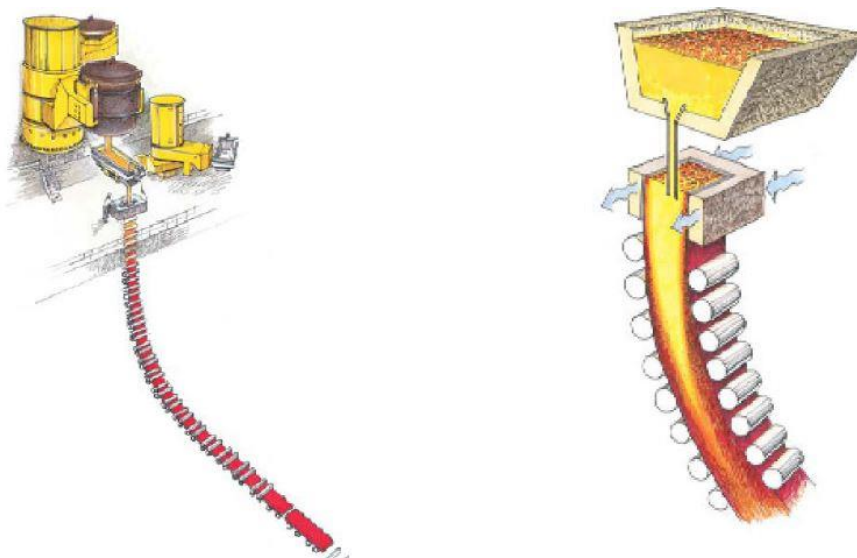


Figura 2.43 - Vazamento contínuo de aço líquido [57]

Através de uma deformação plástica os “slabs” são transformados em “billets”, “blooms” e “brams”, os quais normalmente são dados forma a outros produtos (Figura 2.44):

- Os “billets” são elementos de secção quadrada de onde se produzem fios e barras comerciais;
- Os “blooms” são elementos de secção quadrada de onde se produzem perfis e carris;
- Os “brams” são elementos de secção retangular de onde se produzem placas, chapas e bandas.





Figura 2.44 - Exemplo de "Slabs" e "Billets" - [63], [64]

Ao contrário do método anterior este processo evita segregações e origina menos defeitos siderúrgicos.

### 2.8.2 FORNO DE ARCO ELÉTRICO

Inventado em 1900 por Paul Héroult e construído pela primeira vez em 1907 em Nova Iorque, o forno de arco elétrico é um dos meios utilizados em Portugal para a produção de aço através de sucata (Figura 2.45). O seu nome vem do facto de que o aquecimento do material a fundir é realizado através da criação de um arco elétrico entre o mesmo e eléktodos. Este forno geralmente é constituído por um vaso revestido com materiais refratários, arrefecido a água, com uma cobertura móvel onde se encontram instalados os eléktodos de grafite (geralmente três de forma circular para fornos que utilizam corrente alternada - Figura 2.46) [45].

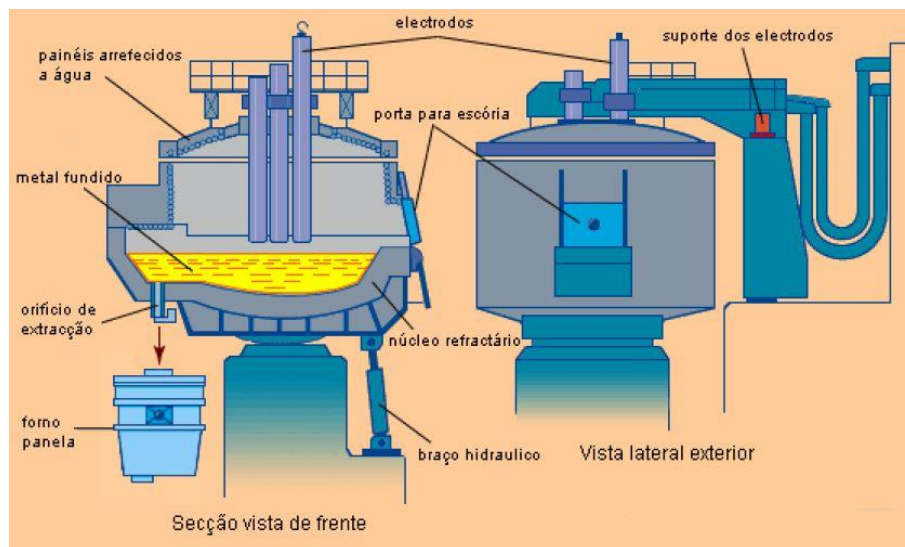


Figura 2.45 - Esquema de um forno de arco elétrico [46]

O arco elétrico forma-se entre os eléktodos e o material a fundir (usualmente sucata), sendo este aquecido tanto pelo calor gerado pela corrente elétrica que o atravessa como também pela energia radiada pelo próprio arco. As temperaturas de trabalho variam entre os 1600 °C e os 4000 °C dependendo do tipo de utilização. Estas características tornam este forno ideal para o fabrico de aços de alta qualidade, nomeadamente os aços ligados que possuem na sua composição elementos como níquel, crómio, vanádio,

etc. As altas temperaturas atingidas (superiores à de outros fornos) permitem a existência destes elementos no forno sem que sejam oxidados. Por outro lado a oxidação dos elementos inconvenientes é realizada pela escória utilizando-se o minério como agente oxidante. Este processo permite uma descarburização quase total.



Figura 2.46 - Eléktodos de grafite [65]

Contudo, estes fornos têm o inconveniente de possuir zonas padrão de pontos frios e quentes. Este problema é ultrapassado na atualidade através de sistemas de queima de oxigénio nas suas paredes, sendo a restante energia química necessária fornecida pela adição de oxigénio e carbono por múltiplos injetores instalados nas paredes do forno.

A retirada do aço líquido do forno pode ser realizada por dois métodos: O modo tradicional onde se inclina o forno para que o líquido escorra para outro recipiente (normalmente um forno panela) ou através de um orifício descentrado no fundo do forno que permite o seu escoamento contínuo (Figura 2.47). Este último método é mais eficaz na medida que minimiza a mistura de nitrogénio e de escória (óxidos metálicos que se acumulam por cima do material fundido) com o aço líquido e ajuda a reduzir a quantidade de impurezas no produto final. As restantes etapas de fabrico são semelhantes à produção pelo alto-forno.

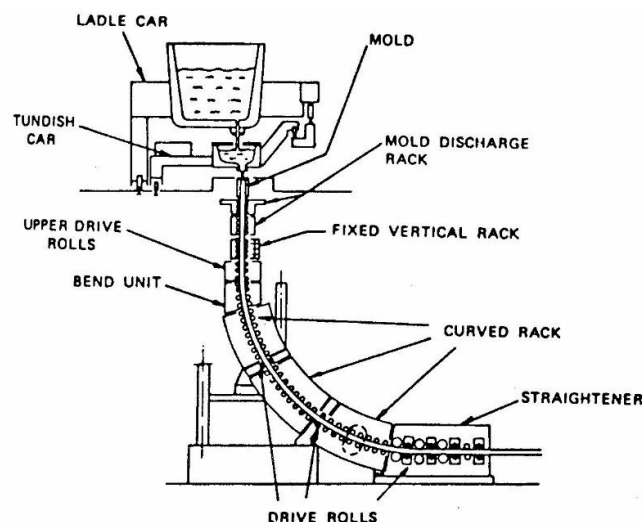


Figura 2.47 - Esquema de vazamento contínuo de aço de um forno de arco elétrico [61]

Estes fornos exigem para o seu funcionamento de uma grande quantidade de energia elétrica sendo preciso cerca de 440KWh por cada tonelada de aço produzido. Na Siderurgia Nacional do Seixal, cujo forno de arco elétrico tem espaço para 120 toneladas, é necessário uma capacidade de 52,8MWh [45].

### 2.8.3 OUTROS PROCESSOS E TÉCNICAS DE FABRICO DE AÇO

Para além do alto-forno e do forno de arco elétrico existem outros métodos de produção como por exemplo o processo de Bessemer (permitiu baixar o custo de produção e obter o aço de baixo carbono), o processo de Siemens-Martin (utilizado no fabrico da maior parte do aço na Grã-Bretanha) a técnica da “metalurgia da panela” (está empregada na Siderurgia Nacional da Maia e permite aumentar a produtividade a pureza dos aços), a técnica da “degaseificação em vazio” (associa-se à metalurgia da panela e permite o fabrico de aços de ultra baixo teor de carbono - inferior a 0,002%), a refusão em vazio (permite obter aços com menor anisotropia de propriedades mecânicas e elevada aptidão ao polimento dado o baixo teor em inclusões) e a refusão por eletro-escória (obtem-se menos inclusões de óxidos e sulfuretos e alcança-se melhores ductilidades e resistências à fadiga e impactos) [45].

## 2.9 CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DAS ESTRUTURAS DE AÇO

O aço possui muita versatilidade e adaptabilidade aos vários sistemas estruturais comparativamente com outros tipos de materiais de construção. Neste ponto indica-se alguns aspetos favoráveis e desfavoráveis decorrentes da utilização do mesmo nas estruturas [43] [66].

Vantagens:

- Razão elevada da resistência/peso que permite a execução de estruturas leves;
- A baixa fluência do aço garante que não há redução considerável da resistência da estrutura com o tempo;
- O comportamento elástico permite uma análise e dimensionamento das estruturas mais fácil e segura já que o aço é um material homogéneo, isotrópico e com propriedades elásticas lineares;
- Com a manutenção adequada é possível garantir ao aço uma durabilidade praticamente infinita (algumas pesquisas com novos aços têm declarado que sob certas condições a pintura pode ser dispensada);
- A natureza dúctil do aço permite a redistribuição de tensões/esforços em pontos de concentração e torna visível a iminência de colapso da estrutura devido às grandes deformações.
- A tenacidade do aço permite que durante o fabrico, transporte e montagem hajam pontos na peça sujeitos a grandes deformações mas sem ficarem com danos;
- O processo de produção garante dimensões e propriedades homogéneas e constantes quer para o material quer para as peças fabricadas;
- Devido ao seu carácter de pré-fabricação é possível ter uma aplicação em campo rápida e limpa reduzindo o tempo de construção;
- Tem uma grande liberdade de formas e flexibilidade para aplicações em casos especiais como por exemplo reforços ou estruturas temporárias;
- Quando as estruturas ficam obsoletas ou inutilizadas é sempre possível a sua desmontagem e montagem noutra local ou a reciclagem para a produção de novo aço.

Desvantagens:

- A grande parte dos aços está sujeita a problemas de corrosão, principalmente quando expostos à atmosfera, pelo que necessitam de tratamentos, cuidados especiais, pinturas e manutenção periódica;
- Em caso de incêndio a resistência do aço é drasticamente reduzida. É necessário a aplicação de materiais com características termo-isolantes e sistemas de aspersão de água em toda a edificação;
- Suscetibilidade à encurvadura devido à esbelteza inerente das estruturas de aço. É necessário considerar vibrações importantes e indesejáveis na construção;
- Necessidade de mão-de-obra mais especializada e equipamentos próprios para os serviços de montagem e solda;
- O carácter de pré-fabricação das peças em aço quase que obriga as estruturas a adaptarem-se à disponibilidade do fornecimento e não o contrário. Isto implica a pouca variabilidade das estruturas e a existência de um padrão comum na construção.

## 2.10 PRINCIPAIS TIPOS DE AÇOS UTILIZADOS EM ENGENHARIA CIVIL

Antigamente, até meados da década de 1960, a construção metálica (à exceção das pontes) era praticamente executada com recurso a um único tipo de aço. Era um aço-carbono cujas normas internacionais especificavam que a sua tensão de cedência mínima fosse 230 MPa. Outros géneros de aço também estavam disponíveis, com propriedades mais específicas como a resistência à corrosão ou soldabilidade, mas raramente eram utilizados na construção de edifícios [35].

No entanto, com o decorrer do tempo e com a evolução da siderurgia e indústria metálica foram surgindo no mercado outros tipos de aços com características muito distintas e cada vez mais direccionados para dar resposta a determinadas condições de serviço. Com o estudo e desenvolvimento da composição química do aço e dos seus tratamentos térmicos e mecânicos é possível, hoje em dia, satisfazer pedidos especiais como a resistência a cargas elevadas, ao desgaste, à corrosão atmosférica, a impactos, a temperaturas altas, etc.

De tal forma é a variedade de aços existentes que a tarefa de escolher o aço apropriado para uma determinada aplicação pode ser bastante complexa devido às inúmeras variáveis, nomeadamente: geometrias e dimensões disponíveis, preço e propriedades requeridas que, por vezes, são antagónicas (elevada dureza simultaneamente com elevada resistência a impactos).

Para resolver estes dilemas é comum o projetista consultar bases de dados ou catálogos onde os aços disponíveis estão agrupados, formando conjuntos para satisfazer determinadas aplicações-tipo. Atualmente estes catálogos (também conhecidos por chave-de-aços) podem apresentar até 20 grupos principais, desde aços para construção civil, aços inoxidáveis, aços para molas, aços para ferramentas, aços rápidos, etc., que por sua vez se podem dividir em subgrupos mais específicos.

É assim possível para o projetista atual aumentar a resistência em determinadas regiões de um edifício sem aumentar excessivamente a volumetria dos membros ou aumentar a resistência à corrosão e a durabilidade sem obrigar a pinturas frequentes.

Dentro de todos os aços utilizados na construção destacam-se quatro grupos principais: os aços carbono, os aços microligados, os aços de liga temperados e revenidos e os aços inoxidáveis.



### 2.10.1 AÇOS ESTRUTURAIS FERRO-CARBONO

Os aços-carbono são utilizados geralmente em construções de estruturas rebitadas ou soldadas e possuem tensões de cedência até cerca de 275 MPa [35]. Apesar do nome estes aços incluem outros elementos de liga para além do carbono. Esta designação é válida desde que os elementos de liga não ultrapassem os seguintes valores: carbono  $< 1,70\%$ , manganês  $< 1,65\%$ , silício  $< 0,60\%$  e cobre  $< 0,60\%$ .

Conforme o teor em carbono podem ser classificados em aços de baixo carbono/macios ( $C < 0,15\%$ ), aços moderados ( $0,15\% \leq C < 0,29\%$ ), aços de médio carbono ( $0,30\% < C < 0,59\%$ ) e aços de alto carbono ( $0,60\% < C < 1,70\%$ ). Com o aumento do teor em carbono aumenta a tensão de cedência mas diminui a tenacidade e a soldabilidade do aço.

Os aços moderados são aqueles que geralmente se utilizam nas estruturas.

### 2.10.2 AÇOS MICROLIGADOS DE ELEVADA RESISTÊNCIA

[Também designados por "High Strength Low Alloy steels" (HSLA) os aços microligados apresentam tensões de cedência compreendidas entre 275 e 500 MPa [35].

Ao contrário dos aços-carbono (onde o aumento de resistência é realizado através do aumento do teor em carbono) os aços microligados veem a sua resistência aumentada por meio da adição de pequenas quantidades de elementos de liga tais como o crómio, o manganês, o molibdénio, o nióbio, o níquel, o vanádio ou o zircónio. A inclusão destes elementos provoca o endurecimento por solução sólida e por precipitação de finas dispersões de carbonetos o que origina o refinamento da microestrutura do aço.

Como resultado deste processo obtém-se boas ductilidades e tensões de cedência elevadas, dualidade esta que não se consegue obter nos aços-carbono.

Devido à sua elevada tenacidade e ao facto de os precipitados estabilizarem o tamanho de grão durante o aquecimento, estes aços possuem uma boa soldabilidade.

### 2.10.3 AÇOS DE LIGA TEMPERADOS E REVENIDOS

O processo de têmpera quando aplicado nos aços de baixa liga permite obter tensões de cedência entre 550 a 800 MPa [35]. No entanto após este tratamento os aços ficam frágeis e perdem tenacidade e soldabilidade. Assim, por forma a contrariar este efeito, os aços são revenidos a temperaturas de 400 a 600 °C com o objetivo de promover alguma difusão do carbono aprisionado na estrutura martensítica reduzindo a fragilidade comum a esta fase.

### 2.10.4 AÇOS INOXIDÁVEIS

Os aços inoxidáveis podem ser divididos em três grupos consoante a fase predominante na sua constituição à temperatura ambiente: inoxidáveis martensíticos, inoxidáveis ferríticos e inoxidáveis austeníticos [35].

Este último grupo corresponde aos aços mais utilizados na construção estruturas (nomeadamente soldada) e em tubagens para fluidos agressivos visto que possuem um bom compromisso entre resistência mecânica, resistência à corrosão e soldabilidade (os aços duplex com estrutura bifásica composta por austenite e ferrite também têm vindo a desenvolver-se ultimamente).

A microestrutura dos aços inoxidáveis austeníticos à temperatura ambiente é formada principalmente por grãos de austenite. Isto é possível porque a adição de alguns elementos de liga como o níquel ou o manganês, permitem expandir a fase CFC (austenite) e retê-la à temperatura ambiente. Esta fase possui uma ductilidade elevada, pode ser endurecida por solução sólida mas não apresenta uma transição dúctil-frágil.

Quando adicionado o cromo permite aumentar consideravelmente a resistência à corrosão do aço. Se o seu teor for superior a 12% forma-se à superfície do aço uma película fina e estável de óxido de cromo, que protege o ferro de oxidar evitando, deste modo, a ferrugem. Daqui resulta o termo aço inoxidável.

Quadro 2.2 - Especificações e propriedades típicas de aços comuns na construção civil [35]

Designação ASTM	Tipo	Teores de C e Mn		Características mecânicas (MPa)		Geometrias típicas disponíveis
		% C	% Mn	$\sigma_{ced}$	$\sigma_{mu}$	
A36	Aço-carbono estrutural	0,26	-	250	400-550	Placas e vigas com diferentes secções
A529	Aço-carbono estrutural	0,27	1,2	290	415-484	Placas, chapas, barras e vigas
A242	Aço microligado de elevada resistência (boa resistência à corrosão)	0,15	1	290-345	435-480	Placas e vigas com geometrias limitadas
A572	Aço microligado de elevada resistência	0,21	1,35	290	415	Diferentes componentes e geometrias
A588	Aço microligado de elevada resistência (boa resistência à corrosão)	0,17-0,19	0,5-1,25	290-345	435-485	Diferentes componentes e geometrias
A514	Aço de liga temperado e revenido	0,12-0,21	0,4-1,1	290-690	690-895	Principalmente placas

Quadro 2.3 - Especificações e propriedades típicas de alguns aços inoxidáveis [35]

Designação ASTM	Tipo	Teores de C, Mn e Ni			Características mecânicas (MPa)	
		% C	% Mn	% Ni	$\sigma_{ced}$	$\sigma_{mu}$
410	Aço inoxidável martensítico	0,08-0,15	11,5-13,5	-	-	-
430	Aço inoxidável ferrítico	0,08	16-18	-	260	450-600
304	Aço inoxidável austenítico	0,05	17-19,5	8-10,5	230	540-750

## 2.11 ENQUADRAMENTO NORMATIVO E LEGISLATIVO DOS AÇOS PARA CONSTRUÇÃO METÁLICA

As regras para a execução de projeto de estruturas metálicas (cujos componentes possuem uma espessura superior ou igual a 3mm) são dadas pelo regulamento EN 1993-1-1 que aborda os requisitos de resistência, utilização, durabilidade e resistência ao fogo das construções em aço.

Para o projeto metálico de um poste de transmissão pode ser necessário recorrer também a outros complementos mais específicos que esta Norma possui nomeadamente:

- EN 1993-1-1: Regras gerais e regras para edifícios [30];
- EN 1993-1-5: Elementos em placas [67];
- EN 1993-1-6: Resistência e estabilidade de cascas [68];
- EN 1993-1-8: Projeto de ligações [69];
- EN 1993-1-9: Fadiga [70];
- EN 1993-1-10: Tenacidade dos materiais segundo a sua espessura [71];
- EN 1993-1-12: Regras adicionais para a extensão da EN 1993 até aços S700 [72];
- EN 1993-3-1: Projeto de torres, mastros e chaminés – torres e mastros [73];
- EN 1993-3-2: Projeto de torres, mastros e chaminés – chaminés [74];

### 2.11.1 EUROCÓDIGO 3 – PARTE 1-1 – REGRAS GERAIS E REGRAS PARA EDIFÍCIOS

#### 2.11.1.1 Propriedades dos materiais

Os diferentes aços estruturais desde S235 até S460 encontram-se nesta Norma e têm aqui as suas propriedades descritas e apresentadas. Estas propriedades constituem valores nominais e devem ser adotados, para efeitos de cálculo, como valores característicos.

A tensão de cedência ( $f_y$ ) e a tensão última ( $f_u$ ) empregados na análise estrutural devem ser obtidos diretamente da norma do produto do aço ou consultados, em alternativa, pelo Quadro 2.4 e Quadro 2.5.

Quadro 2.4 - Valores nominais da tensão de cedência e da tensão última à tração para aços estruturais laminados a quente [30]

Norma e classe de aço	Espessura nominal t do componente da secção (mm)			
	t ≤ 40 mm		40 mm < t ≤ 80 mm	
	f <sub>y</sub> (MPa)	f <sub>u</sub> (MPa)	f <sub>y</sub> (MPa)	f <sub>u</sub> (MPa)
EN 10025-2				
S 235	235	360	215	360
S 275	275	430	255	410
S 355	355	490	335	470
S 450	440	550	410	550
EN 10025-3				
S 275 N/NL	275	390	255	370
S 355 N/NL	355	490	335	470
S 420 N/NL	420	520	390	520
S 460 N/NL	460	540	430	540
EN 10025-4				
S 275 M/ML	275	370	255	360
S 355 M/ML	355	470	335	450
S 420 M/ML	420	520	390	500
S 460 M/ML	460	540	430	530
EN 10025-5				
S 235 W	235	360	215	340
S 355 W	355	490	335	490
EN 10025-6				
S 460 Q/QL/QL1	460	570	440	550

Quadro 2.5 - Valores nominais da tensão de cedência e da tensão última à tração para seções tubulares [30]

Norma e classe de aço	Espessura nominal t do componente da seção (mm)			
	t ≤ 40 mm		40 mm < t ≤ 80 mm	
	f <sub>y</sub> (MPa)	f <sub>u</sub> (MPa)	f <sub>y</sub> (MPa)	f <sub>u</sub> (MPa)
EN 10210-1				
S 235 H	235	360	215	340
S 275 H	275	430	255	410
S 355 H	355	510	335	490
S 275 NH/NLH	275	390	255	370
S 355 NH/NLH	355	490	335	470
S 420 NH/NLH	420	540	390	520
S 460 NH/NLH	460	560	430	550
EN 10219-1				
S 235 H	235	360		
S 275 H	275	430		
S 355 H	355	510		
S 275 NH/NLH	275	370		
S 355 NH/NLH	355	470		
S 460 NH/NLH	460	550		
S 275 MH/MLH	275	360		
S 355 MH/MLH	355	470		
S 420 MH/MLH	420	500		
S 460 MH/MLH	460	530		

Nos quadros anteriores incluem-se referências às diretrizes para aços de construção soldável:

- EN 10025-1: Produtos laminados a quente de aços de construção – Condições técnicas gerais de fornecimento;
- EN 10025-2: Produtos laminados a quente de aços de construção – Condições técnicas de fornecimento para aços não ligados;
- EN 10025-3: Produtos laminados a quente de aços de construção – Condições técnicas de fornecimento de aços de construção soldáveis de grão fino no estado normalizado/laminado normalizado;
- EN 10025-4: Produtos laminados a quente de aços de construção – Condições técnicas de fornecimento de aços de construção soldáveis de grão fino obtidos por laminagem termomecânica;
- EN 10025-5: Produtos laminados a quente de aços de construção – Condições técnicas de fornecimento de aços de construção com superior resistência à corrosão atmosférica;

- EN 10025-6: Produtos laminados a quente de aços de construção – Condições técnicas de fornecimento para produtos planos de aço de construção de alto limite elástico no estado temperado e revenido;
- EN 10210-1: Perfis ocios estruturados acabados a quente de aços não ligados e de grão fino – Parte 1: Condições técnicas de fornecimento;
- EN 10219-1: Perfis ocios estruturais soldados e conformados a frio de aços não ligados e de grão fino. Parte 1: Condições técnicas de fornecimento.

#### 2.11.1.2 Ductilidade

Para os aços estruturais é requerida uma ductilidade mínima expressa em termos dos limites seguintes:

- A relação entre os valores mínimos especificados da tensão última à tração e da tensão de cedência ( $f_u / f_y$ ) deve ser igual ou superior a 1,10;
- A extensão após rotura, determinada com base num comprimento inicial entre referências de  $5,65 \cdot \sqrt{A_0}$  (em que  $A_0$  corresponde à área inicial da secção transversal), não pode ser inferior a 15%;
- A extensão última ( $\epsilon_u$ ), correspondente à tensão última ( $f_u$ ), deve ser igual ou superior a  $15 \cdot (f_y / E)$ .

#### 2.11.1.3 Resistência à rotura frágil

É de extrema importância que o material empregue na construção possua uma tenacidade suficiente para evitar a rotura frágil dos elementos tracionados sujeitos ao valor de temperatura mínima de serviço que possa ocorrer durante o tempo de vida útil previsto para a estrutura. Contudo, caso se satisfaça as condições presentes na Norma EN 1993-1-10 [71] para o valor mínimo de temperatura deixa de ser necessário fazer verificações adicionais em relação a este tipo de rotura. Em elementos comprimidos deve-se adotar um valor mínimo de resistência à rotura frágil (tenacidade) utilizando o quadro 2.1 da EN 1993-1-10 [71] para tensões iguais a 25% da tensão de cedência.

#### 2.11.1.4 Tolerâncias

Durante a fase de projeto deve-se utilizar os valores nominais das dimensões sendo que no caso de componentes soldados devem-se introduzir as tolerâncias indicadas na EN 1090 [75]. Assume-se que as tolerâncias dimensionais e de massa das secções laminadas a quente, das secções tubulares e das chapas se encontram em conformidade com a norma do produto (ETAG ou ETA) exceto se forem especificadas tolerâncias mais exigentes.

#### 2.11.1.5 Valores de cálculo das propriedades dos materiais

Os valores de cálculo das propriedades dos materiais a serem empregues na análise estrutural são os seguintes:

- Módulo de elasticidade:  $E = 210 \text{ GPa}$ ;
- Módulo de distorção:  $G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} \approx 81 \text{ GPa}$ ;
- Coeficiente de Poisson em regime elástico:  $\nu = 0,3$ ;
- Coeficiente de dilatação térmica linear:  $\alpha = 12 \cdot 10^{-6}$  (para  $T \leq 100 \text{ °C}$ );
- Massa volúmica:  $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$ .

### 2.11.1.6 Propriedades segundo a espessura

A EN 1993-1-10 [71] também contém orientações sobre a escolha das propriedades conforme a espessura. Caso seja necessário aços com propriedades melhoradas segundo a espessura, deve-se utilizar um aço da classe de qualidade especificada na EN 10164 [76].

### 2.11.1.7 Durabilidade

Os requisitos gerais relativos à durabilidade dos elementos metálicos encontram-se na EN 1990 [77] enquanto a EN 1090 [75] apresenta os meios de execução do tratamento de proteção. Os componentes suscetíveis à corrosão, ao desgaste mecânico ou à fadiga devem ser projetados para que a sua inspeção, manutenção ou reconstrução possa ser efetuada de modo satisfatório assegurando-se sempre acessos propícios e adequados. No presente caso admite-se que os elementos constituintes dos postes de transmissão são previamente tratados com uma galvanização (conforme a Norma EN 1461 [78]) ou uma pintura protetora (EN 12944 [79]) antes de serem instalados.

De modo semelhante, uma verificação da resistência à fadiga deve ser incorporada nos casos seguintes:

- Elementos que suportam equipamento de elevação ou cargas rolantes;
- Elementos sujeitos a ciclos de tensão repetidos devido a vibrações;
- Elementos sujeitos a vibrações induzidas pelo vento;
- Elementos sujeitos a oscilações induzidas por multidões.

No caso de estudo a estrutura em causa encontra-se submetida a vibrações por força do vento pelo que, de acordo com a regulamentação, seria necessário uma análise à fadiga dos elementos constituintes. Contudo, visto que se trata de um tema vasto e complexo, esta verificação não é incluída no projeto do presente documento.

## 2.11.2 EUROCÓDIGO 3 – PARTE 1-10 – TENACIDADE DOS MATERIAIS SEGUNDO A SUA ESPESSURA

### 2.11.2.1 Escolha dos materiais para a tenacidade à fratura

As regras desta diretriz são aplicáveis a elementos tracionados, elementos soldados e a elementos sujeitos a fadiga nos quais uma determinada parte do ciclo de tensões é de tração. Para peças solicitadas unicamente à compressão não é necessário especificar a tenacidade à fratura. Estas regras devem ser utilizadas para especificar uma classe de aço adequada a partir das Normas Europeias relativas aos produtos de aço listadas na EN 1993-1-1 [30].

### 2.11.2.2 Procedimento

A classe e a qualidade do aço a ser empregue deverá ser escolhida tendo em conta o seguinte:

- Propriedades do aço: tensão de cedência em função da espessura do material,  $f_y(t)$ , e tenacidade expressa em termos de  $T_{27J}$  ou  $T_{40J}$  (Temperatura à qual a energia mínima do impacto de rotura do provete de ensaio não será inferior a 27 ou 40 Joules, respetivamente, no ensaio de tenacidade Charpy);
- Características do elemento: forma, detalhe e espessura do elemento, concentração de tensões em função dos detalhes indicados na EN 1993-1-9 [70] e considerações apropriadas para defeitos de fabrico (por exemplo, fissuras segundo a espessura ou fendas superficiais semi-elípticas);

- Situações de projeto: valor de cálculo da temperatura mínima do elemento, tensões máximas devidas às ações permanentes e deformações impostas correspondentes à situação de projeto obtida pela expressão 2.1 da Norma em análise [71], tensões residuais, considerações para a evolução das fissuras sob carregamento de fadiga durante o intervalo entre inspeções (se relevante), velocidade e deformação para ações acidentais (se relevante) e o grau de enformagem a frio (se relevante).

Para além dos métodos alternativos para a determinação dos requisitos de tenacidade (método da mecânica da fratura ou avaliação com base em modelos), no que respeita à rotura frágil, a máxima espessura admissível dos elementos de aço deve ser obtida através do quadro 2.1 do regulamento em questão [71].

### 2.11.2.3 Espessuras máximas admissíveis

A Figura 2.48 fornece a espessura máxima admissível do elemento em função da classe do aço, da sua tenacidade em termos do valor KV (energia do impacto em Joules necessária para levar à rotura um provete do ensaio de tenacidade Charpy, a uma dada temperatura de ensaio), do nível de tensões de referência ( $\sigma_{ed}$ ) e da temperatura de referência ( $T_{ed}$ ). Os seus valores baseiam-se nas seguintes hipóteses:

- Os valores satisfazem os requisitos de fiabilidade da EN 1990 [77] para a qualidade geral do material;
- A velocidade de deformação de referência ( $\dot{\epsilon}_0 = 4 \cdot 10^{-4}$  /segundo) cobre os efeitos das ações dinâmicas para a maioria das situações de projeto persistentes e transitórias. Para outras velocidades de deformação (por exemplo para ações de impacto), os valores tabelados podem ser utilizados reduzindo  $T_{ed}$  por uma dedução  $\Delta T_{\dot{\epsilon}}$  obtida por:

$$\Delta T_{\dot{\epsilon}} = - \frac{1440 - f_y(t)}{550} \cdot \left[ \ln \left( \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right]^{1,5} \text{ (}^\circ\text{C)}$$

- Considera-se um material não enformado a frio com  $\epsilon_{cf} = 0\%$ . Para ter em conta a enformagem a frio de aços sem envelhecimento, os valores podem ser utilizados corrigindo  $T_{ed}$  pela dedução de  $\Delta T_{\epsilon cf}$ :

$$\Delta T_{\epsilon cf} = -3 \cdot \epsilon_{cf} \text{ (}^\circ\text{C)}$$

- Os valores nominais da tenacidade expressos em termos de  $T_{27J}$  baseiam-se nas normas de produtos seguintes: EN 10025, EN 10210-1 e EN 10219-1. Para outros valores é utilizada a seguinte correlação:

$$T_{40J} = T_{27J} + 10 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

$$T_{30J} = T_{27J} + 0 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

- Para elementos sujeitos à fadiga estão abrangidas todas as categorias de pormenor da EN 1993-1-9 [70] aplicáveis à tensão nominal.

Este quadro fornece os valores máximos admissíveis da espessura em função de três níveis de tensão expressos sob a forma de proporções do valor nominal da tensão de cedência:

- $\sigma_{ed} = 0,75 \cdot f_y(t)$  (MPa)
- $\sigma_{ed} = 0,50 \cdot f_y(t)$  (MPa)
- $\sigma_{ed} = 0,25 \cdot f_y(t)$  (MPa)



Onde  $f_y(t)$  pode ser determinado através de:

$$f_y(t) = f_{y,nom} - 0,25 \frac{t}{t_0} \text{ (MPa)}$$

Em que:

$t$  – espessura da chapa em mm;

$t_0$  – igual a 1mm.

Os valores presentes na Figura 2.48 podem ser interpolados linearmente mas não é possível extrapolar para além dos valores extremos.

Classe de aço	Qualidade	KV		Temperatura de referência T <sub>Ed</sub> [°C]																							
		a T [°C]	J <sub>min</sub>	10	0	-10	-20	-30	-40	-50	10	0	-10	-20	-30	-40	-50	10	0	-10	-20	-30	-40	-50			
				σ <sub>Ed</sub> = 0,75 f <sub>y</sub> (t)						σ <sub>Ed</sub> = 0,50 f <sub>y</sub> (t)						σ <sub>Ed</sub> = 0,25 f <sub>y</sub> (t)											
S235	JR	20	27	60	50	40	35	30	25	20	90	75	65	55	45	40	35	135	115	100	85	75	65	60			
	J0	0	27	90	75	60	50	40	35	30	125	105	90	75	65	55	45	175	155	135	115	100	85	75			
	J2	-20	27	125	105	90	75	60	50	40	170	145	125	105	90	75	65	200	200	175	155	135	115	100			
S275	JR	20	27	55	45	35	30	25	20	15	80	70	55	50	40	35	30	125	110	95	80	70	60	55			
	J0	0	27	75	65	55	45	35	30	25	115	95	80	70	55	50	40	165	145	125	110	95	80	70			
	J2	-20	27	110	95	75	65	55	45	35	155	130	115	95	80	70	55	200	190	165	145	125	110	95			
	M,N	-20	40	135	110	95	75	65	55	45	180	155	130	115	95	80	70	200	200	190	165	145	125	110			
	ML,NL	-50	27	185	160	135	110	95	75	65	200	200	180	155	130	115	95	230	200	200	200	190	165	145			
S355	JR	20	27	40	35	25	20	15	15	10	65	55	45	40	30	25	25	110	95	80	70	60	55	45			
	J0	0	27	60	50	40	35	25	20	15	95	80	65	55	45	40	30	150	130	110	95	80	70	60			
	J2	-20	27	90	75	60	50	40	35	25	135	110	95	80	65	55	45	200	175	150	130	110	95	80			
	K2,M,N	-20	40	110	90	75	60	50	40	35	155	135	110	95	80	65	55	200	200	175	150	130	110	95			
	ML,NL	-50	27	155	130	110	90	75	60	50	200	180	155	135	110	95	80	210	200	200	200	175	150	130			
S420	M,N	-20	40	95	80	65	55	45	35	30	140	120	100	85	70	60	50	200	185	160	140	120	100	85			
	ML,NL	-50	27	135	115	95	80	65	55	45	190	165	140	120	100	85	70	200	200	200	185	160	140	120			
S460	Q	-20	30	70	60	50	40	30	25	20	110	95	75	65	55	45	35	175	155	130	115	95	80	70			
	M,N	-20	40	90	70	60	50	40	30	25	130	110	95	75	65	55	45	200	175	155	130	115	95	80			
	QL	-40	30	105	90	70	60	50	40	30	155	130	110	95	75	65	55	200	200	175	155	130	115	95			
	ML,NL	-50	27	125	105	90	70	60	50	40	180	155	130	110	95	75	65	200	200	200	175	155	130	115			
	QL1	-60	30	150	125	105	90	70	60	50	200	180	155	130	110	95	75	215	200	200	200	175	155	130			
S690	Q	0	40	40	30	25	20	15	10	10	65	55	45	35	30	20	20	120	100	85	75	60	50	45			
	Q	-20	30	50	40	30	25	20	15	10	80	65	55	45	35	30	20	140	120	100	85	75	60	50			
	QL	-20	40	60	50	40	30	25	20	15	95	80	65	55	45	35	30	165	140	120	100	85	75	60			
	QL	-40	30	75	60	50	40	30	25	20	115	95	80	65	55	45	35	190	165	140	120	100	85	75			
	QL1	-40	40	90	75	60	50	40	30	25	135	115	95	80	65	55	45	200	190	165	140	120	100	85			
	QL1	-60	30	110	90	75	60	50	40	30	160	135	115	95	80	65	55	200	200	190	165	140	120	100			

Figura 2.48 - Valores máximos admissíveis da espessura do elemento t, em mm (quadro 2.1) [71]

## 2.11.3 EUROCÓDIGO 3 – PARTE 1-12 – REGRAS ADICIONAIS PARA A EXTENSÃO DA EN 1993 ATÉ AÇOS S700

## 2.11.3.1 Regras adicionais para a Norma EN 1993-1-1

Para aços superiores a S460, tratados previamente na EN 1993-1-1 [30], a Norma em questão indica os valores nominais recomendados da tensão de cedência e tensão última a serem empregues na análise estrutural (Quadro 2.6 e Quadro 2.7).

Quadro 2.6 - Valores nominais da tensão de cedência e tensão última à tração para aços estruturais laminados a quente [72]

Norma e classe de aço	Espessura nominal $t$ do componente da secção (mm)					
	$t \leq 50$ mm		$50 \text{ mm} < t \leq 100$ mm		$100 \text{ mm} < t \leq 150$ mm	
	$f_y$ (MPa)	$f_u$ (MPa)	$f_y$ (MPa)	$f_u$ (MPa)	$f_y$ (MPa)	$f_u$ (MPa)
EN 10026-6						
S 500 Q/QL/QL1	500	590	480	590	440	540
S 550 Q/QL/QL1	550	640	530	640	490	590
S 620 Q/QL/QL1	620	700	580	700	560	650
S 690 Q/QL/QL1	690	770	650	760	630	710

Quadro 2.7 - Valores nominais da tensão de cedência e tensão última à tração para produtos planos laminados a quente [72]

Norma e classe de aço	Espessura nominal $t$ do componente da secção (mm)			
	$1,5 \text{ mm} \leq t \leq 8$ mm		$8 \text{ mm} < t \leq 16$ mm	
	$f_y$ (MPa)	$f_u$ (MPa)	$f_y$ (MPa)	$f_u$ (MPa)
EN 10149-2				
S 500MC	500	550	500	550
S 550MC	550	600	550	600
S 600MC	600	650	600	650
S 650MC	650	700	630	700
S 700MC	700	750	680	750

Em termos de ductilidade dos aços em questão a Norma [72] recomenda os seguintes valores:

- A relação entre os valores mínimos especificados da tensão última à tração e da tensão de cedência ( $f_u / f_y$ ) deve ser igual ou superior a 1,05;
- A extensão após rotura, determinada com base num comprimento inicial entre referências de  $5,65 \cdot \sqrt{A_0}$  (em que  $A_0$  corresponde à área inicial da secção transversal), não pode ser inferior a 10%;
- A extensão última ( $\epsilon_u$ ), correspondente à tensão última ( $f_u$ ), deve ser igual ou superior a  $15 \cdot (f_y / E)$

Admite-se que os aços listados nos quadros anteriores se encontram em conformidade com os requerimentos dados em 3.10.1.3 – Resistência à rotura frágil. É de se referir que a capacidade de uma estrutura metálica em absorver deformações se relaciona com o seu alongamento e com as propriedades resistentes do aço. O seu comportamento global depende das deformações antecipadas e o seu comportamento local depende dos detalhes utilizados.

Devido às possíveis altas tensões existentes, os aços apresentados requerem cuidados especiais como no controlo de deformações e concentração de tensões. A análise estrutural global deve considerar, sempre que relevante, as deformações impostas.

Aquando uma análise global plástica não-linear deve-se considerar as plastificações parciais dos membros apenas em zonas plásticas. Os parágrafos 3 e 4 do subcapítulo 5.4.1 da EN 1993-1-1 [30] não podem ser aplicados aos aços presentes nos quadros anteriores.

Em casos onde seja necessário assegurar a capacidade de deformação plástica os aços em questão não devem ser utilizados.

#### 2.11.3.2 Regras adicionais para a Norma EN 1993-1-6

O Anexo B da Norma EN 1993-1-6 [68] não é aplicável a aços superiores a S460 até S700.

#### 2.11.3.3 Regras adicionais para a Norma EN 1993-1-8

Existem regras adicionais para o regulamento de ligações mas o mesmo não é tratado no estudo presente.

#### 2.11.3.4 Regras adicionais para a Norma EN 1993-1-10

Para a determinação das espessuras máximas permitidas para aços superiores a S460 até S700 pode-se recorrer à Figura 2.49:

Steel grade	Subgrade	Charpy energy CVN		Reference temperature $T_{Ed}$ [°C]																							
		at $T$ [°C]	$J_{min}$	10	0	-10	-20	-30	-40	-50	10	0	-10	-20	-30	-40	-50	10	0	-10	-20	-30	-40	-50			
				$\sigma_{Ed} = 0,75 f_y(t)$								$\sigma_{Ed} = 0,50 f_y(t)$								$\sigma_{Ed} = 0,25 f_y(t)$							
EN 10025-6																											
S500	Q	0	40	55	45	35	30	20	15	15	85	70	60	50	40	35	25	145	125	105	90	80	65	55			
	Q	-20	30	65	55	45	35	30	20	15	105	85	70	60	50	40	35	170	145	125	105	90	80	65			
	QL	-20	40	80	65	55	45	35	30	20	125	105	85	70	60	50	40	195	170	145	125	105	90	80			
	QL	-40	30	100	80	65	55	45	35	30	145	125	105	85	70	60	50	200	195	170	145	125	105	90			
	QL1	-40	40	120	100	80	65	55	45	35	170	145	125	105	85	70	60	200	200	195	170	145	125	105			
	QL1	-60	30	140	120	100	80	65	55	45	200	170	145	125	105	85	70	205	200	200	195	170	145	125			
S550	Q	0	40	50	40	30	25	20	15	10	80	65	55	45	35	30	25	140	120	100	85	75	60	50			
	Q	-20	30	60	50	40	30	25	20	15	95	80	65	55	45	35	30	160	140	120	100	85	75	60			
	QL	-20	40	75	60	50	40	30	25	20	115	95	80	65	55	45	35	185	160	140	120	100	85	75			
	QL	-40	30	90	75	60	50	40	30	25	135	115	95	80	65	55	45	200	185	160	140	120	100	85			
	QL1	-40	40	110	90	75	60	50	40	30	160	135	115	95	80	65	55	200	200	185	160	140	120	100			
	QL1	-60	30	130	110	90	75	60	50	40	185	160	135	115	95	80	65	200	200	200	185	160	140	120			
S620	Q	0	40	45	35	25	20	15	15	10	70	60	50	40	30	25	20	130	110	95	80	65	55	45			
	Q	-20	30	55	45	35	25	20	15	15	85	70	60	50	40	30	25	150	130	110	95	80	65	55			
	QL	-20	40	65	55	45	35	25	20	15	105	85	70	60	50	40	30	175	150	130	110	95	80	65			
	QL	-40	30	80	65	55	45	35	25	20	125	105	85	70	60	50	40	200	175	150	130	110	95	80			
	QL1	-40	40	100	80	65	55	45	35	25	145	125	105	85	70	60	50	200	200	175	150	130	110	95			
	QL1	-60	30	120	100	80	65	55	45	35	170	145	125	105	85	70	60	200	200	200	175	150	130	110			
S690	Q	0	40	40	30	25	20	15	10	10	65	55	45	35	30	20	20	120	100	85	75	60	50	45			
	Q	-20	30	50	40	30	25	20	15	10	80	65	55	45	35	30	20	140	120	100	85	75	60	50			
	QL	-20	40	60	50	40	30	25	20	15	95	80	65	55	45	35	30	165	140	120	100	85	75	60			
	QL	-40	30	75	60	50	40	30	25	20	115	95	80	65	55	45	35	190	165	140	120	100	85	75			
	QL1	-40	40	90	75	60	50	40	30	25	135	115	95	80	65	55	45	200	190	165	140	120	100	85			
	QL1	-60	30	110	90	75	60	50	40	30	160	135	115	95	80	65	55	200	200	190	165	140	120	100			
EN 10149-2																											
S500	MC	-20	40	80	65	55	45	35	30	20	125	105	85	70	60	50	40	195	170	145	125	105	90	80			
S550	MC	-20	40	75	60	50	40	30	25	20	115	95	80	65	55	45	35	185	160	140	120	100	85	75			
S600	MC	-20	40	70	55	45	35	30	20	15	105	90	75	60	50	40	35	180	155	130	110	95	80	70			
S650	MC	-20	40	65	50	40	30	25	20	15	100	85	70	55	45	35	30	170	145	125	105	90	75	65			
S700	MC	-20	40	60	45	35	30	25	20	15	95	80	65	50	45	35	30	165	140	120	100	85	70	60			

Figura 2.49 - Valores máximos admissíveis da espessura do elemento t, em mm [72]

Os valores do presente quadro podem ser interpolados linearmente mas a extrapolação para além dos valores extremos não é permitida.

#### 2.11.3.5 Regras adicionais para a Norma EN 1993-3-1

Para o projeto de torres, mastros e chaminés os aços expostos pela Norma EN 1993-1-12 [72] podem ser empregues sem regras adicionais.

#### 2.11.3.6 Outras condicionantes

Para além das condicionantes adicionais expostas anteriormente não existem mais regras relevantes sobre os materiais para o projeto metálico de um poste de transmissão.

# 3

## AÇÕES REGULAMENTARES

### 3.1 AÇÃO DO VENTO

#### 3.1.1 IMPORTÂNCIA DO VENTO

O vento é uma das principais ameaças à segurança e estabilidade física de construções leves e esbeltas em altura. Os postes de transmissão são edificações bastante comuns que se incluem nesta definição. A ação do vento é de extrema importância para o dimensionamento destas estruturas não só pelas grandes áreas de exposição que possuem mas também por serem bastante sensíveis no seu comportamento dinâmico.

Segundo Loredou-Souza [80] a resposta de estruturas sob a ação do vento pode envolver uma ampla gama de ações estruturais, incluindo forças resultantes, momentos fletores, tensões nos cabos, bem como deflexões e acelerações.

É habitual a força do vento ser condicionante no projeto em detrimento de outras ações gravosas tal como os sismos. A ação sísmica depende essencialmente da massa da estrutura mas face ao valor reduzido da massa em presença nos postes de transmissão esta ação provoca esforços finais menores que o vento pelo que a sua consideração perde significado [81].

De um ponto de vista probabilístico e segundo Holmes [82], os sismos de larga escala surgem com muito menos frequência que tempestades fortes e austeras, apesar de ambos produzirem aproximadamente a mesma quantidade de estragos. Em quase todos os dias do ano uma tempestade severa ocorre em algum lugar na Terra provocando efeitos devastadores.

Também implícito ao vento e às suas tempestades incide o perigo de colisão de materiais e detritos voadores a grande velocidade com as estruturas. Apesar da baixa probabilidade pode ser um evento capaz de originar grandes estragos e colocar em causa a segurança da estrutura.

#### 3.1.2 ORIGEM DO VENTO

O vento é um fenómeno natural atmosférico que consiste no deslocamento de massas de ar relativamente à Terra de forma variável e intemporal. A principal causa para estes movimentos é essencialmente a energia solar, num processo de conversão de energia térmica (temperatura) em energia cinética (velocidade). O aquecimento da atmosfera – energia térmica - dá-se através da irradiação e reflexão de calor solar pela superfície terrestre em conjunto com a energia solar que é absorvida diretamente pelo próprio ar. Durante o dia o solo tanto emite, reflete e refrata parte da energia solar recebida como também irradia energia térmica proveniente da atividade geológica da Terra (assim como durante a noite).



Contudo, este aquecimento não é uniforme em todos os locais devido a vários fatores físicos do solo. Este facto provoca variações de temperatura no ar e consequentes diferenças de pressão no mesmo. Esta última grandeza varia na razão inversa da temperatura, isto é, o ar quando aquece dilata-se e torna-se mais leve (menor pressão), o ar frio contrai-se e torna-se mais denso (maior pressão). O equilíbrio de pressões é atingido através do movimento e circulações atmosféricas - energia cinética - entre as regiões de alta para baixa pressão resultando em ventos de várias velocidades e de diversas direções.

### 3.1.3 CIRCULAÇÃO GLOBAL IDEALIZADA

A energia solar absorvida por unidade de área nas regiões equatoriais (latitude  $0^\circ$ ) é maior em comparação com os pólos, pois nas primeiras os raios solares incidem de forma quase perpendicular enquanto nas últimas incidem tangencialmente. Deste modo, as massas de ar equatoriais tornam-se menos densas e portanto têm propensão para subir enquanto as massas de ar das regiões polares, mais frias e densas, têm tendência para descer. Por continuidade de massa, estabelece-se então uma célula de circulação: O ar equatorial presente na superfície (que precedeu dos pólos – circulação global inferior) aquece e ascende até à Tropopausa (onde deixa de subir porque nesta o ambiente já é mais quente), retorna aos pólos através de grandes altitudes (circulação global superior) onde, por fim, arrefece e decai novamente para a superfície polar. Este ciclo sugerido por George Hadley, em 1735, é constituído por uma grande célula de convecção em cada hemisfério mas não tem em atenção, contudo, o efeito da rotação da Terra tal como se representa na Figura 3.1:

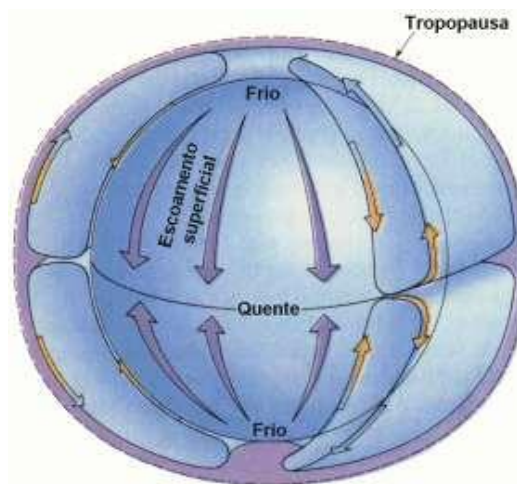


Figura 3.1 - Circulação global idealizada dos ventos [83]

Quando se inclui o efeito de rotação da Terra, a força de Coriolis impede que os ventos provenientes do Equador atinjam os pólos gerando uma componente dominante este/oeste no fluxo das células de circulação atmosférica (e oceânica) [84].

O padrão idealizado dos ventos globais (proposto na década de 1920) é então constituído por três grandes células de circulação em cada hemisfério (Figura 3.2): A célula de Hadley, a célula de Ferrel e a célula polar [85]. Nestas células subsistem, também, três ventos característicos à superfície que constituem o grupo da Circulação média à superfície: ventos alíseos, ventos do Oeste e os ventos polares, que são descritos seguidamente.

- Célula de Hadley: ocorre entre 0° e 30° de latitude. É uma célula convectiva onde, devido ao aquecimento, o movimento do ar é ascendente sobre o Equador, dirigindo-se para os pólos nos níveis superiores da atmosfera. Nas latitudes subtropicais o ar frio desce e retorna para a o Equador à superfície. Devido à rotação da Terra residem nesta célula os ventos alíseos de superfície constituídos por correntes no sentido de Este para Oeste e os ventos contra-alíseos que sopram de Oeste para Este a grandes altitudes;
- Célula de Ferrel: predomina entre 30° e 60° de latitude. Nesta célula a circulação é oposta à de Hadley pelo que o ar se dirige para os pólos na superfície e para o Equador em altitude. Os ventos de superfície são dominantes de Oeste para Este (ventos do Oeste) e em simétrico a grande altitudes.
- Célula Polar: prevalece entre 60° e 90° de latitude. Aqui o ar sobe, diverge, e desloca-se para os pólos em altura. Uma vez sobre os pólos, o ar arrefece e desce dando origem às altas pressões existentes na superfície das regiões polares. Existem, na mesma, os ventos polares que circulam, à superfície, de Este para Oeste e no sentido oposto em altitude.

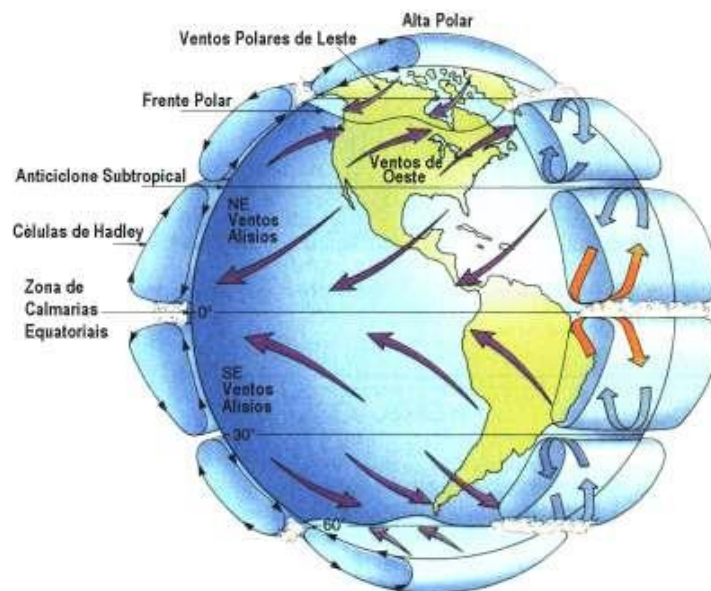


Figura 3.2 - Células de circulação globais [83]

#### 3.1.4 CIRCULAÇÕES REGIONAIS E LOCAIS

O aquecimento diferenciado de algumas áreas, devido a características intrínsecas do terreno, como por exemplo, diferentes topografias, inclinações do terreno ou diferentes capacidades térmicas, origina gradientes de pressão de pequena escala que dão origem a circulações de massas de ar locais.

Segundo Campos [84], “A altitudes baixas (até cerca de 100 metros de altitude) os ventos são extremamente influenciados pela superfície, sendo deflectidos por obstáculos e zonas mais rugosas, e a sua direção resulta da soma dos efeitos globais e locais”.

Entre as circulações Locais incluem-se, principalmente, as brisas marítimas e terrestres, ventos de vale e de montanha e monções:

- Brisas marítimas e terrestres (Figura 3.3): A brisa marítima surge durante o dia onde o ar sobre o solo aquece mais rapidamente que o ar marinho. Deste modo, origina-se uma zona de baixa pressão sobre o continente que atrai ventos provenientes do mar. A brisa continental acontece durante o período noturno onde as massas de ar presentes sobre o solo arrefecem mais rapidamente que o ambiente marinho. Assim, gera-se um gradiente de pressão que origina brisas no sentido continente-mar. De acordo com Henriques [86], “A intensidade da brisa terrestre é, desta forma, menor do que a brisa marítima, pois o diferencial de temperaturas é menor no período noturno”;



Figura 3.3 - Brisa marítima e brisa terrestre [87]

- Ventos de vale e de montanha (Figura 3.4): Durante o período diurno o ar presente no fundo dos vales aquece fazendo-o fluir ao longo das encostas sob a forma de ventos de vale. Durante a noite ocorre a inversão da direção do vento pelo que se começa a acumular no fundo dos vales o ar frio e denso originando os ventos de montanha [88];

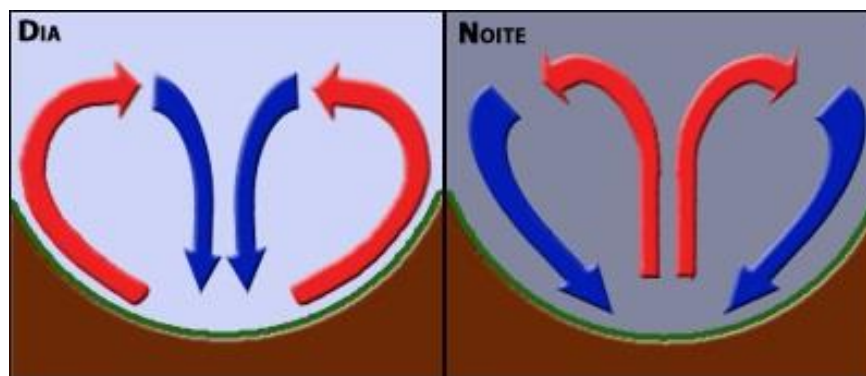


Figura 3.4 - Ventos de vale e ventos de montanha [88]

- Monções: As monções acontecem quando há períodos muito secos e muito chuvosos em função do deslocamento das zonas de pressões. São ventos sazonais que mudam de direção e que se fazem sentir, principalmente, na região Sul e Sudeste da Ásia [89].



### 3.1.5 CARACTERIZAÇÃO REGULAMENTAR DA AÇÃO DO VENTO NO CORPO DA ESTRUTURA

A ação do vento sobre os postes será determinada através das diretrizes em vigor, nomeadamente o Eurocódigo EN 1991-1-4 [90]. Esta Norma permite obter um modelo de cargas equivalentes à ação do vento através do cálculo da pressão dinâmica de pico,  $q_p(z)$ , dos coeficientes de força,  $c_f$ , e de pressão e do coeficiente estrutural,  $c_{se}$ . A resposta da estrutura a estas ações depende, essencialmente, da sua forma, dimensão e propriedades dinâmicas.

As ações do vento calculadas neste regulamento correspondem a valores característicos e são determinadas a partir dos valores de referência da velocidade do vento ou da pressão dinâmica. De acordo com o Eurocódigo EN 1991-1-4 [90] os valores de referência são valores característicos cuja probabilidade anual de serem excedidos é de 0,02, o que equivale a um período médio de retorno igual a 50 anos, ou seja, corresponde ao quantilho 0,98 da distribuição de probabilidades.

### 3.1.6 VELOCIDADE MÉDIA DO VENTO EM ALTURA

A velocidade média do vento a uma altura  $z$  acima do solo,  $v_m(z)$ , deve ser determinada a partir do valor de referência da velocidade do vento,  $v_b$  (o qual depende do regime local de ventos) e da variação do vento em função da altura, determinada a partir da rugosidade do terreno,  $c_r(z)$ , e da orografia,  $c_o(z)$ , tal como se apresenta na expressão (3.1):

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_o(z) \cdot v_b \quad (3.1)$$

onde:

$c_r(z)$  – Coeficiente de rugosidade;

$c_o(z)$  – Coeficiente de orografia;

$v_b$  – Valor de referência da velocidade do vento (m/s).

O valor de referência da velocidade do vento,  $v_b$ , dado pela equação (3.2), é definido em função da direção do vento e da época do ano a uma altura de 10 metros acima da superfície de um terreno da categoria II.

$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,0} \quad (3.2)$$

em que:

$c_{dir}$  – Coeficiente de direção;

$c_{season}$  – Coeficiente de sazão;

$v_{b,0}$  – Valor básico da velocidade de referência do vento em território nacional (m/s).

O valor básico da velocidade de referência do vento,  $v_{b,0}$ , corresponde ao valor característico da velocidade média do vento referida a períodos de 10 minutos, independentemente da direção do vento e da época do ano, a uma altura de 10 metros acima do nível do solo em terreno do tipo campo aberto, com vegetação rasteira, tal como erva, e obstáculos isolados com separações entre si de, pelo menos, 20 vezes

a sua altura (terreno de categoria II). Este valor é definido em função da sua localização no contexto nacional e pode ser obtido através do Quadro 3.1.

Quadro 3.1 - Valor básico da velocidade de referência do vento em território nacional [90]

Zona	$v_{b,0}$ (m/s)
Zona A – a generalidade do território, exceto as regiões pertencentes à zona B	27
Zona B – os arquipélagos dos Açores e da Madeira e as regiões do continente situadas numa faixa costeira com 5 km de largura ou a altitudes superiores a 600 m	30

Os coeficientes de direção,  $c_{dir}$ , e sazão,  $c_{season}$ , podem ser empregues em condições especiais, contudo, é recomendado a atribuição do valor unitário aos mesmos tornando o método mais condicionante.

Não obstante, em situações tais que o efeito em causa esteja associado a uma direção particular do vento e que a esta correspondam velocidades claramente inferiores às máximas no local – facto a ser justificado com recurso a dados estatísticos do próprio regime de vento da região em causa –, poderá ser considerada uma redução na velocidade de referência limitada a 15% do valor básico, ou seja,  $c_{dir} \geq 0,85$ .

### 3.1.6.1 Rugosidade do terreno

O coeficiente de rugosidade,  $c_r(z)$ , tem em conta a variabilidade da velocidade média do vento no local da construção em resultado da altura acima do nível do solo e da rugosidade do terreno a barlavento da construção, na direção do vento considerada. Este é definido pelas expressões (3.3) e (3.4):

$$c_r(z) = k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad \text{para } z_{\min} \leq z \leq z_{\max} \quad (3.3)$$

$$c_r(z) = c_r(z_{\min}) \quad \text{para } z \leq z_{\min} \quad (3.4)$$

em que:

$z_{\min}$  – Altura mínima dependente da categoria de terreno, em metros (Quadro 3.2);

$z_0$  – Comprimento de rugosidade, em metros (Quadro 3.2);

$z_{0,II} = 0,05$  m (categoria de terreno II);

$z_{\max}$  – A ser considerada igual a 200 m;

$k_r$  – Coeficiente de terreno dependente do comprimento de rugosidade,  $z_0$ , calculado através de (3.5):

$$k_r = 0,19 \cdot \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0,07} \quad (3.5)$$

Quadro 3.2 - Parâmetros  $z_0$  e  $z_{\min}$  [90]

Categoria de terreno	$z_0$ (m)	$z_{\min}$ (m)
0 - Mar ou zona costeira exposta aos ventos de mar	0,003	1
I - Lagos ou zona plana e horizontal com vegetação negligenciável e livre de obstáculos	0,01	1
II - Zona de vegetação rasteira, tal como erva, e obstáculos isolados (árvores, edifícios) com separações entre si de, pelo menos, 20 vezes a sua altura	0,05	2
III - Zona com uma cobertura regular de vegetação ou edifícios, ou com obstáculos isolados com separações entre si de, no máximo, 20 vezes a sua altura (por exemplo: aldeias, zonas suburbanas, florestas permanentes)	0,3	5
IV - Zona na qual pelo menos 15% da superfície está coberta por edifícios com uma altura média superior a 15 m	1,0	10

A categoria do terreno a considerar para uma dada direção do vento depende da rugosidade do solo e da extensão com rugosidade de terreno uniforme dentro de um sector angular de  $30^\circ$  definido em torno da direção do vento, tal como se ilustra na figura Figura 3.5. Caso nesta consideração existam duas ou mais áreas de atribuição, é essencial que se utilize a categoria com menor comprimento de rugosidade. O valor recomendado para barlavento poderá ser obtido no Anexo Nacional da Norma EN 1991-1-4 [90].

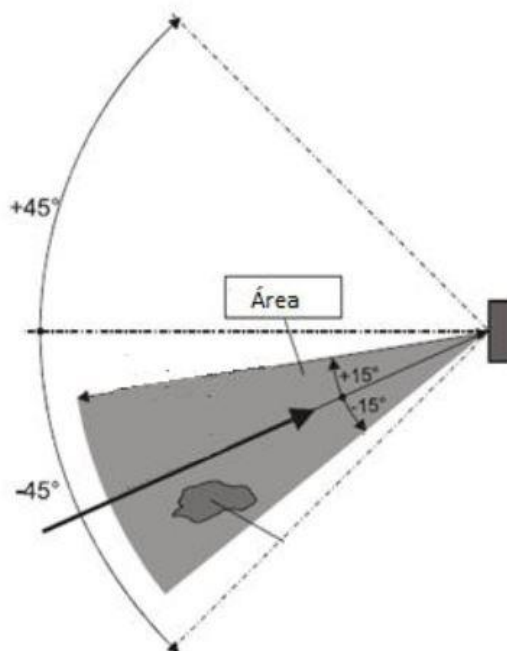


Figura 3.5 - Avaliação da rugosidade do terreno [90]

### 3.1.6.2 Orografia

Nos casos em que, devido à orografia (por exemplo, junto de colinas ou falésias), as velocidades do vento sejam aumentadas em mais de 5%, os efeitos correspondentes deverão ser considerados utilizando o coeficiente de orografia,  $c_0$ , calculado através das equações (3.6), (3.7) e (3.8) expressas no Anexo Nacional A.3 da Norma EN 1991-1-4 [90]. Este conceito é de grande importância pela sua influência direta na velocidade do vento.

$$c_0 = 1 \quad \text{para } \Phi < 0,05 \quad (3.6)$$

$$c_0 = 1 + 2 \cdot s \cdot \Phi \quad \text{para } 0,05 < \Phi < 0,3 \quad (3.7)$$

$$c_0 = 1 + 0,6 \cdot s \quad \text{para } \Phi > 0,3 \quad (3.8)$$

sendo que:

$s$  – Coeficiente obtido através das Figura 3.6 e Figura 3.7, retiradas da EN 1991-1-4 [90], considerando a relação com o comprimento efetivo da vertente virada a barlavento,  $L_e$ ;

$\Phi$  – Inclinação, na direção do vento, da vertente virada a barlavento.

Os efeitos da orografia poderão ser desprezados quando o declive médio do terreno a barlavento é inferior a  $3^\circ$ . O terreno a barlavento poderá ser tomado em consideração até uma distância de 10 vezes a altura do elemento orográfico isolado.

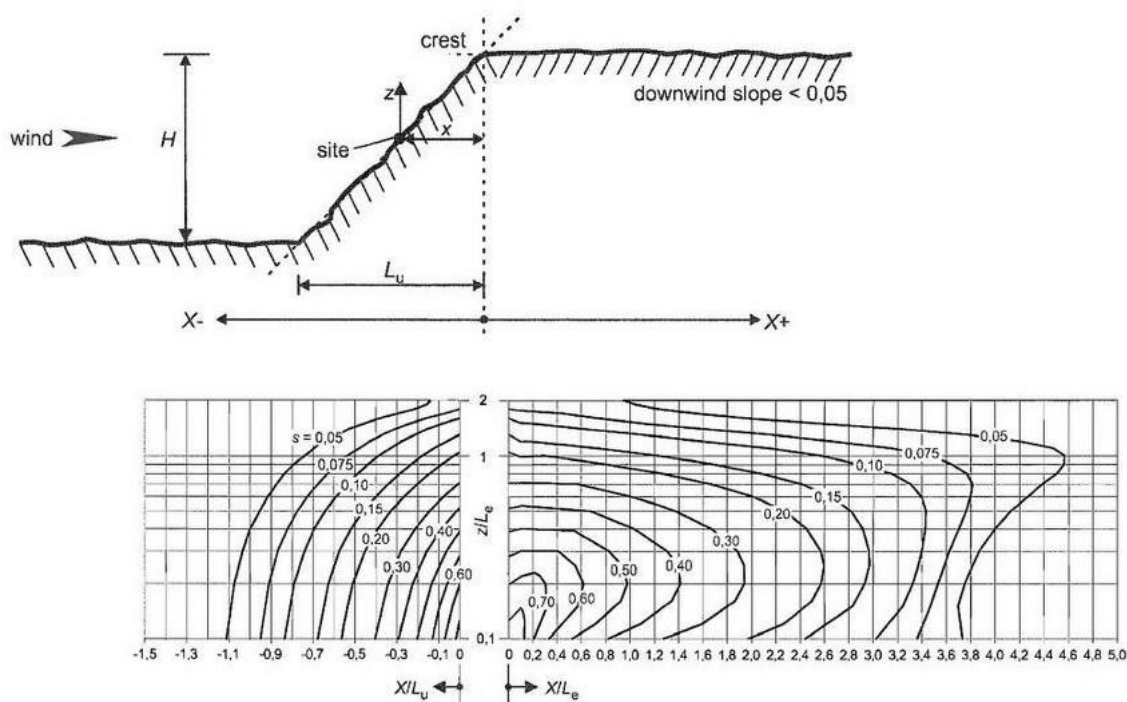
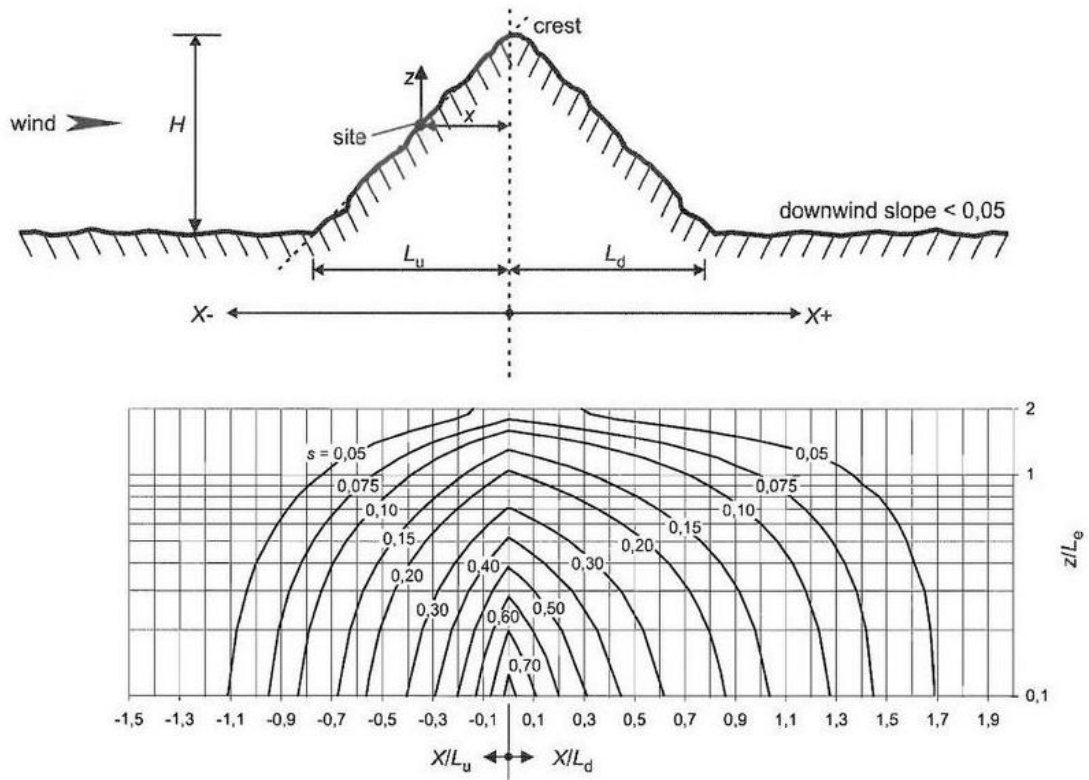


Figura 3.6 - Coeficiente  $s$  para falésias e escarpas [90]


 Figura 3.7 - Coeficiente  $s$  para colinas isoladas ou em cadeia [90]

### 3.1.6.3 Turbulência do vento

A intensidade de turbulência à altura  $z$ ,  $I_v(z)$ , é definida pelo quociente entre o desvio padrão da turbulência e a velocidade média do vento. A componente de turbulência da velocidade do vento tem um valor médio nulo e um desvio padrão  $\sigma_v$ . Este último pode ser calculado através da expressão (3.9)

$$\sigma_v = k_r \cdot v_b \cdot k_I \quad (3.9)$$

Para a determinação de  $I_v(z)$  recorre-se às equações (3.10) e (3.11):

$$I_v(z) = \frac{\sigma_v}{v_m(z)} = \frac{k_I}{c_0(z) \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad \text{para } z_{\min} \leq z \leq z_{\max} \quad (3.10)$$

$$I_v(z) = I_v(z_{\min}) \quad \text{para } z < z_{\min} \quad (3.11)$$

onde:

$k_I$  – Coeficiente de turbulência ao qual é recomendado pela Norma [90] a atribuição do valor unitário ou outro valor específico presente no Anexo Nacional;

$c_0$  – Coeficiente de orografia, descrito em 3.1.6.2;

$z_0$  – Comprimento de rugosidade, fornecido no Quadro 3.2.

### 3.1.6.4 Pressão dinâmica de pico

A pressão dinâmica de pico à altura  $z$ ,  $q_p(z)$ , a qual resulta da velocidade média e das flutuações de curta duração da velocidade do vento, é calculado através da equação (3.12):

$$q_p(z) = [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2(z) = c_e(z) \cdot q_b \quad (3.12)$$

em que:

$\rho$  – Massa volúmica do ar, a qual depende da altitude, da temperatura e da pressão atmosférica previstas para a região durante situações de vento intenso. O valor recomendado é  $1,25 \text{ kg/m}^3$  mas outros valores poderão ser fornecidos no Anexo Nacional;

$c_e(z)$  – Coeficiente de exposição, obtido pela expressão (3.13) e ilustrado na Figura 3.8 para o caso de um terreno plano em que  $c_0 = 1,0$  e  $k_1 = 1,0$ ;

$$c_e(z) = \frac{q_p(z)}{q_b} \quad (3.13)$$

$q_b$  – Pressão dinâmica de referência, que pode ser determinada recorrendo à expressão (3.14):

$$q_b = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2 \quad (3.14)$$

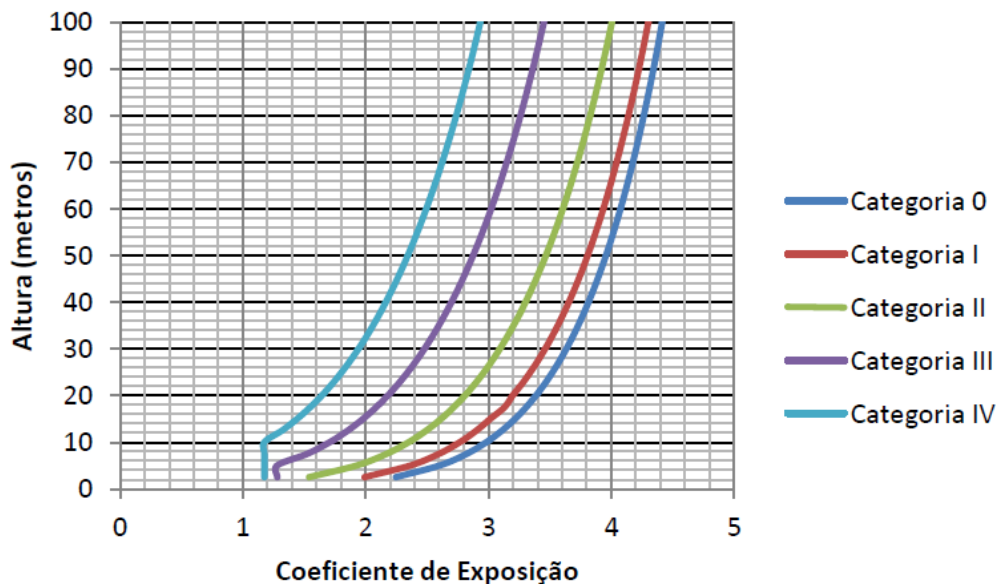


Figura 3.8 - Coeficiente de exposição (adaptado) [90]

### 3.1.7 FORÇAS EXERCIDAS PELO VENTO

A força exercida pelo vento,  $F_w$ , sobre uma construção ou um seu componente pode ser calculada pela equação (3.15) e depende da pressão dinâmica de pico, do coeficiente de força, do coeficiente estrutural e da área de exposição da construção.

$$F_w = c_f \cdot c_s c_d \cdot q_p(z) \cdot A_{\text{ref}} \quad (3.15)$$

sendo:

$c_f$  – Coeficiente de força da estrutura ou elemento estrutural;

$c_s c_d$  – Coeficiente estrutural;

$q_p(z)$  – Pressão dinâmica de pico ( $\text{kN/m}^2$ );

$A_{\text{ref}}$  – Área de referência exposta ao vento da construção ou elemento estrutural.

### 3.1.8 COEFICIENTE DE FORÇA

O coeficiente de força,  $c_f$ , fornece o efeito global do vento sobre uma construção, um elemento estrutural ou um componente, incluindo o efeito do atrito que depende das características globais da própria estrutura. Este parâmetro pode ser calculado para elementos estruturais de secção poligonal regular e secção circular.

De acordo com capítulo 7.8 e 7.9 do Eurocódigo EN 1991-1-4 [90], o coeficiente de força,  $c_f$ , é dado pela seguinte expressão (3.16):

$$c_f = c_{f,0} \cdot \psi_\lambda \quad (3.16)$$

em que:

$c_{f,0}$  – Coeficiente de força para elementos estruturais sem livre escoamento em torno das extremidades;

$\psi_\lambda$  – Coeficiente de efeitos de extremidade.

#### 3.1.8.1 Secções Poligonais Regulares

Para secções poligonais regulares, com 5 a 18 lados, o Eurocódigo [90] fornece valores recomendados e conservativos do coeficiente de força para elementos estruturais sem livre escoamento em torno das extremidades,  $c_{f,0}$ , presentes no **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

Quadro 3.3 - Coeficiente de força,  $c_{f,0}$ , para secções poligonais regulares

Número de lados	Secções	Condições da superfície e dos cantos	Número de Reynolds, $Re$	$c_{f,0}$
5	Pentágono	Todas	Todos	1,80
6	Hexágono	Todas	Todos	1,60
8	Octógono	Superfície lisa $r/b < 0,075$	$Re \leq 2,4 \cdot 10^5$	1,45
			$Re \geq 3 \cdot 10^5$	1,30
		Superfície lisa $r/b \geq 0,075$	$Re \leq 2 \cdot 10^5$	1,30
			$Re \geq 7 \cdot 10^5$	1,10
10	Decágono	Todas	Todos	1,30
12	Dodecágono	Superfície lisa cantos arredondados	$2 \cdot 10^5 < Re < 1,2 \cdot 10^6$	0,90
			$Re < 4 \cdot 10^5$	1,30
		Todas as outras condições	$Re > 4 \cdot 10^5$	1,10
16-18	Hexadecágono - Octodecágono	Superfície lisa cantos arredondados	$Re < 2 \cdot 10^5$	Considerar secção circular
			$2 \cdot 10^5 \leq Re < 1,2 \cdot 10^6$	0,70

onde:

$r$  – Raio de curvatura do canto;

$b$  – Diâmetro da circunferência circunscrita definido na Figura 3.9;

$Re$  – Número de Reynolds, definido pela expressão (3.17), calculado com  $v = v_m$ , sendo este último valor obtido na expressão (3.1).

$$Re = \frac{b \cdot v(z)}{\nu} \quad (3.17)$$

em que:

$b$  – Diâmetro exterior da secção do cilindro;

$\nu$  – Viscosidade cinemática do ar ( $\nu = 15 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ).



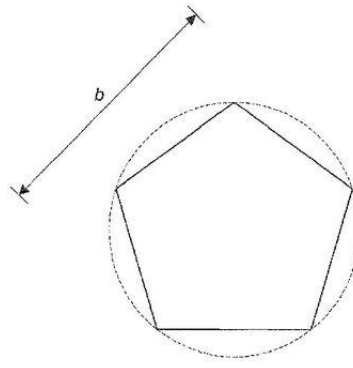


Figura 3.9 - Seção poligonal regular [90]

O coeficiente de força,  $c_{f,0}$ , para a ação do vento que atua sobre uma estrutura de seção transversal poligonal com 20 ou mais lados poderá, segundo Antunes [91], ser admitido igual aos valores propostos para seções circulares.

### 3.1.8.2 Seções circulares

Em cilindros de base circular o parâmetro  $c_{f,0}$  pode ser obtido pela Figura 3.10 e pelas equações (3.18), (3.19) e (3.20) [91]:

$$c_{f,0} = 1,2 \quad \text{para } Re \leq 1,814 \cdot 10^5 \quad (3.18)$$

$$c_{f,0} = \max \left( \left[ \frac{0,11}{\left( \frac{Re}{10^6} \right)^{1,4}} \right]; \left[ 1,2 + \frac{0,18 \cdot \log \left( 10 \cdot \frac{k}{b} \right)}{1 + 0,4 \cdot \log \left( \frac{Re}{10^6} \right)} \right]; 0,4 \right) \quad \text{para } 1,814 \cdot 10^5 < Re \leq 10^7 \text{ e } k/b \geq 10^{-5} \quad (3.19)$$

$$c_{f,0} = \max \left( \left[ \frac{0,11}{\left( \frac{Re}{10^6} \right)^{1,4}} \right]; \left[ 1,2 + \frac{0,18 \cdot \log \left( 10 \cdot 10^{-5} \right)}{1 + 0,4 \cdot \log \left( \frac{Re}{10^6} \right)} \right]; 0,4 \right) \quad \text{para } 1,814 \cdot 10^5 < Re \leq 10^7 \text{ e } k/b < 10^{-5} \quad (3.20)$$

onde:

$k$  – Coeficiente de rugosidade superficial da estrutura (0,05 mm para aço liso, 0,2 mm para superfícies galvanizadas, 0,02 mm para superfícies pintadas a pistola de ar e 0,006 mm para revestimentos por pinturas lisas);

$b$  – Diâmetro exterior da seção do cilindro;

$Re$  – Número de Reynolds ao nível correspondente, calculado pela expressão (3.17), onde  $v(z)$  corresponde à velocidade, em m/s, dada pela seguinte equação:

$$v(z) = \sqrt{\frac{2 \cdot q_p}{\rho}} \quad (3.21)$$

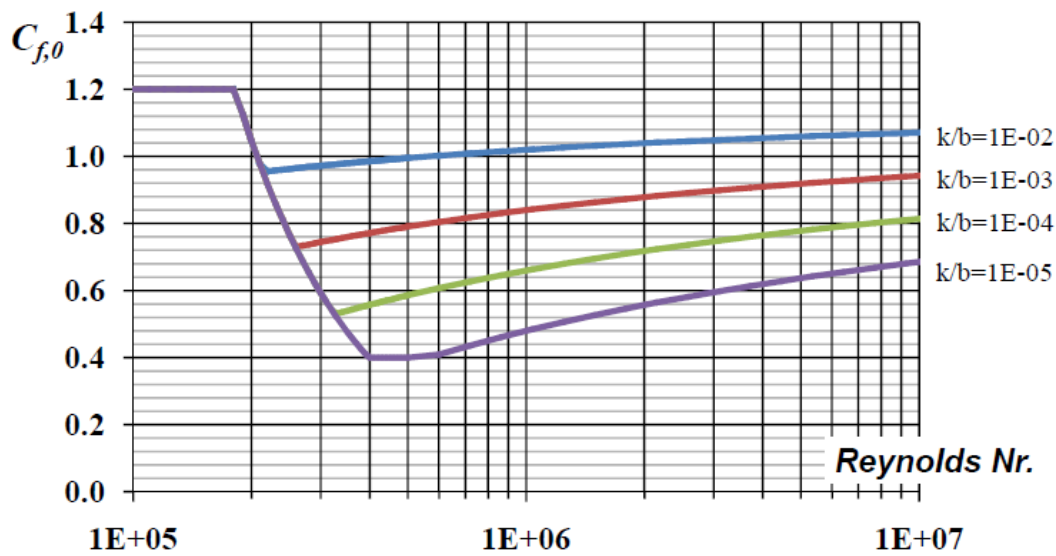


Figura 3.10 - Coeficiente de força para cilindros de base circular (adaptado) [90]

### 3.1.8.3 Coeficiente de efeitos de extremidade

O coeficiente de efeitos de extremidade,  $\Psi_\lambda$ , deve ser determinado em função da esbelteza da estrutura,  $\lambda$ . Este parâmetro permite ter em atenção a redução da força exercida pelo vento caso o escoamento possa contornar as extremidades da estrutura de uma forma menos restringida.

A esbelteza pode ser determinada pelo Quadro 7.16 do Eurocódigo EN 1991-1-4 [90], onde:

$$\lambda = \min\left[1,4 \cdot \frac{l}{b} ; 70\right] \quad \text{para mastros de secções poligonais} \quad (3.22)$$

Este coeficiente depende ainda do índice de cheios da estrutura,  $\phi$ , onde em mastros tubulares apenas é de importância o caso em que este valor é unitário.

De acordo com a Figura 7.36 do Eurocódigo [90] e segundo Antunes [91] obtemos as expressões:

$$\Psi_\lambda = \frac{1}{90} \cdot (\lambda - 0,6) + 0,6 \quad \text{para } 1 \leq \lambda < 10 \quad (3.23)$$

$$\Psi_\lambda = \frac{25}{9000} \cdot (\lambda - 10) + 0,7 \quad \text{para } 10 \leq \lambda < 100 \quad (3.24)$$

$$\Psi_\lambda = \frac{5}{1000} \cdot (\lambda - 100) + 0,95 \quad \text{para } 100 \leq \lambda < 200 \quad (3.25)$$

### 3.1.9 COEFICIENTE ESTRUTURAL

O coeficiente estrutural,  $c_s c_d$  [92], tem em conta a probabilidade de ocorrência não simultânea de dois componentes: o coeficiente de dimensão,  $c_s$ , associado à ocorrência das pressões do vento de rajada ao longo de toda a estrutura e um coeficiente dinâmico,  $c_d$ , relacionado com o efeito das vibrações da estrutura devido aos fenómenos de turbulência da ação do vento.

O coeficiente estrutural é dado por:

$$c_s c_d = \frac{1+2 \cdot k_p \cdot I_v(z_s) \cdot \sqrt{B^2 + R^2}}{1+7 \cdot I_v(z_s)} \quad (3.26)$$

com:

$z_s$  – Altura de referência para a determinação do coeficiente estrutural, quando não aplicável  $z_s$  poderá ser considerado igual à altura da construção,  $h$ ;

$k_p$  – Fator de pico, definido como o quociente entre o valor máximo da parte flutuante a resposta e o desvio padrão desta;

$I_v(z_s)$  – Intensidade de turbulência à altura de referência, definido no subcapítulo 3.1.6.3;

$B^2$  – Coeficiente de resposta quase-estática, que tem em conta a falta de total correlação das pressões sobre a superfície da construção;

$R^2$  – Coeficiente de resposta em ressonância, relacionado com o efeito da turbulência em ressonância com o modo de vibração.

O coeficiente de dimensão ( $c_s$ ) e o coeficiente dinâmico ( $c_d$ ) podem ser obtidos individualmente através das seguintes equações:

$$c_s = \frac{1+7 \cdot I_v(z_s) \cdot \sqrt{B^2}}{1+7 \cdot I_v(z_s)} \quad (3.27)$$

$$c_d = \frac{1+2 \cdot k_p \cdot I_v(z_s) \cdot \sqrt{B^2 + R^2}}{1+7 \cdot I_v(z_s) \cdot \sqrt{B^2}} \quad (3.28)$$

A determinação do fator de pico,  $k_p$ , e dos coeficientes de resposta quase-estática e em ressonância,  $B^2$  e  $R^2$ , respetivamente, podem ser executados através de dois procedimentos diferentes presentes nos Anexos B e C do Eurocódigo EN 1991-1-4 [90].

Apesar do método do Anexo C permitir um procedimento de cálculo mais simples comparativamente com o método do Anexo B, o Anexo Nacional do Eurocódigo EN 1991-1-4 [90] define o método do Anexo B como normativo, tendo o método do Anexo C apenas caráter informativo. É de salientar, a título indicativo, que a diferença no valor do coeficiente estrutural entre os dois métodos não excede os 5% [90].

Os subcapítulos seguintes apresentam os processos de cálculo inerentes ao método do Anexo B.

### 3.1.9.1 Turbulência do vento

A escala de turbulência do vento,  $L(z)$ , representa a dimensão média dos turbilhões do vento natural. Para alturas inferiores a 200 metros, a escala de turbulência poderá ser calculada através das expressões (3.29) e (3.30):

$$L(z_s) = L_t \cdot \left(\frac{z_s}{z_t}\right)^\alpha \quad \text{para } z_s \geq z_{\min} \quad (3.29)$$

$$L(z_s) = L(z_{\min}) \quad \text{para } z_s < z_{\min} \quad (3.30)$$

onde:

$\alpha$  – Constante determinada pela equação (3.31):

$$\alpha = 0,67 + 0,05 \cdot \ln(z_0) \quad (3.31)$$

$z_s$  – Altura de referência, em metros, para a determinação do coeficiente estrutural na Figura 3.11, quando não aplicável  $z_s$  poderá ser considerado igual à altura da construção,  $h$ ;

$z_{\min}$  – Altura mínima definida no Quadro 3.2;

$z_t$  – Altura de referência,  $z_t = 200$  m;

$L_t$  – Escala de comprimento de referência,  $L_t = 300$  m.

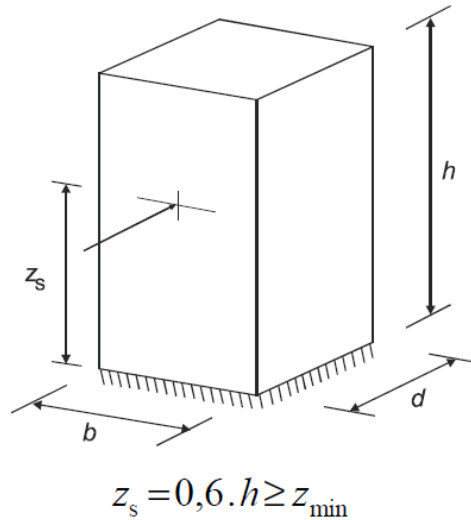


Figura 3.11 - Cálculo da altura de referência [90]

### 3.1.9.2 Densidade espectral de potência adimensional

A densidade espectral de potência adimensional,  $S_L(z_s, n)$ , permite determinar a distribuição de energia do vento sob a forma de frequência através da expressão (3.32). A função de densidade espectral de potência é ilustrada na Figura 3.12.

$$S_L(z_s, n) = \frac{n \cdot S_v(z_s, n)}{\sigma_v^2} = \frac{6,8 \cdot f_L(z_s, n)}{(1 + 10,2 \cdot f_L(z_s, n))^{5/3}} \quad (3.32)$$

em que:

$n$  – Frequência natural de vibração da estrutura, em Hz. No caso presente importa a frequência do primeiro modo de vibração pelo que  $n = n_{1,x}$ ;

$S_v(z_s, n)$  – Densidade espectral definida apenas para frequências positivas;

$f_L(z_s, n)$  – Frequência adimensional obtida por:

$$f_L(z_s, n) = \frac{n \cdot L(z_s)}{v_m(z_s)} \quad (3.33)$$

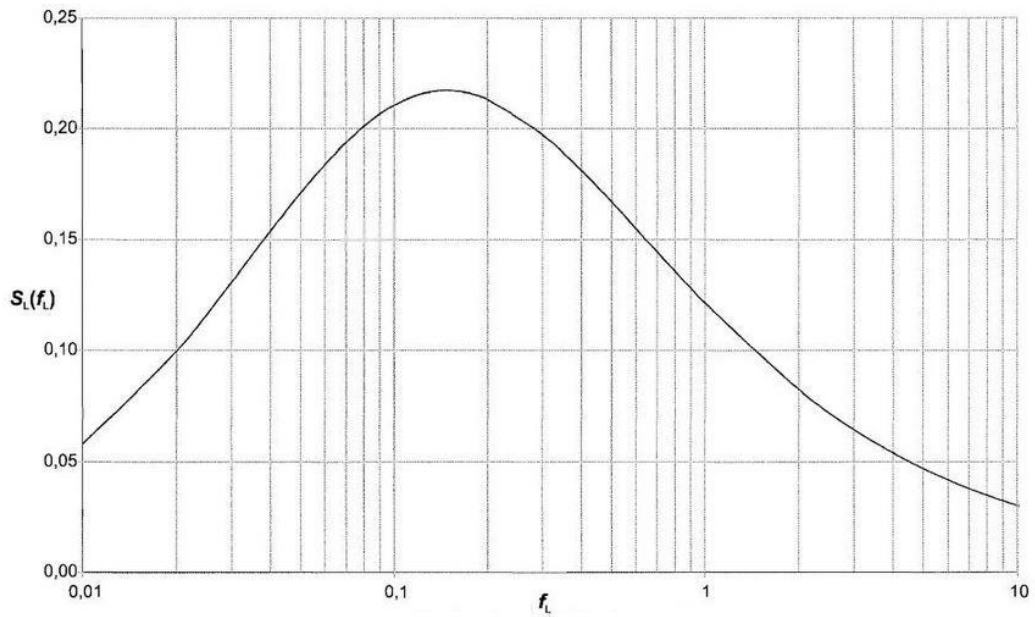


Figura 3.12 - Função de densidade espectral de potência [90]

### 3.1.9.3 Coeficiente de resposta quase-estática

O coeficiente de resposta quase-estática,  $B^2$ , traduz a falta de total correlação das pressões na superfície da construção. De modo conservativo pode-se admitir este fator igual à unidade, no entanto o coeficiente de escala será também unitário. O Eurocódigo [90] propõe uma regra para a determinação do coeficiente de resposta quase-estática,  $B^2$ , através da seguinte equação:

$$B^2 = \frac{1}{1 + 0,9 \cdot \left( \frac{b+h}{L(z_s)} \right)^{0,63}} \quad (3.34)$$

Em que:

$L(z_s)$  – Turbulência do vento, descrito em 3.1.9.1;

$b$  – Largura da estrutura (metros). Quando não há regularidade geométrica da mesma deverá ser tido em conta o menor valor, que nos postes de transmissão corresponde ao topo (mais conservativo);

$h$  – Altura da estrutura (metros).

### 3.1.9.4 Fator de pico

O fator de pico,  $k_p$ , é definido como o quociente entre o valor máximo da parte flutuante da resposta e o desvio padrão desta. O Eurocódigo [90] estabelece que deverá ser obtido pela expressão (3.35), que se baseia na equação de Davenport [93]:

$$k_p = \max \left( \sqrt{2 \cdot \ln(v \cdot T)} + \frac{0,6}{\sqrt{2 \cdot \ln(v \cdot T)}} ; 3 \right) \quad (3.35)$$

com:

$T$  – Duração de integração (período) da velocidade média do vento,  $T = 600$  segundos (10min);

$v$  – Frequência de passagens ascendentes calculada pela expressão (3.36);

$$v = \max \left( n_{1,x} \cdot \sqrt{\frac{R^2}{B^2 + R^2}} ; 0,08 \right) \quad (3.36)$$

### 3.1.9.5 Coeficiente de resposta em ressonância

O coeficiente de resposta em ressonância,  $R^2$ , tem em conta o efeito da turbulência em ressonância com o modo de vibração considerado da estrutura e pode ser obtido pela equação seguinte:

$$R^2 = \frac{\pi^2}{2 \cdot \delta} \cdot S_L(z_s, n_{1,x}) \cdot R_h(\eta_h) \cdot R_b(n_b) \quad (3.37)$$

em que:

$\delta$  – Decremento logarítmico total de amortecimento;

$S_L$  – Função densidade espectral de potência adimensional;

$R_h, R_b$  – São funções de admitância aerodinâmica.

As funções aerodinâmicas alusivas à altura e à largura poderão ser determinadas de acordo com as expressões seguintes:

$$\eta_h = \frac{4,6 \cdot h}{L(z_s)} \cdot f_L(z_s, n_{1,x}) \quad (3.38)$$

$$\eta_b = \frac{4,6 \cdot b}{L(z_s)} \cdot f_L(z_s, n_{1,x}) \quad (3.39)$$

$$R_h = \frac{1}{\eta_h} - \frac{1}{2 \cdot \eta_h^2} (1 - e^{-2 \cdot \eta_h}) \quad (3.40)$$

$$R_h = 1 \quad \text{para } \eta_h = 0 \quad (3.41)$$

$$R_b = \frac{1}{\eta_b} - \frac{1}{2 \cdot \eta_b^2} (1 - e^{-2 \cdot \eta_b}) \quad (3.42)$$

$$R_b = 1 \quad \text{para } \eta_b = 0 \quad (3.43)$$

### 3.1.9.6 Decremento logarítmico de amortecimento

O decremento logarítmico de amortecimento,  $\delta$ , resulta da soma do decremento logarítmico de amortecimento estrutural,  $\delta_s$ , com decremento logarítmico de amortecimento aerodinâmico para o modo fundamental,  $\delta_a$ , e com o decremento logarítmico de amortecimento devido à presença de equipamentos de dissipação especiais,  $\delta_d$ , tais como: amortecedores de massa sintonizados - *tuned mass dampers (TMD)* e amortecedores de movimento de líquido - *sloshing tanks*. Este último valor deve ser obtido experimentalmente ou com base em métodos teóricos da especialidade.

O estudo em causa não terá em conta este parâmetro uma vez que não serão aplicados na estrutura quaisquer dispositivos especiais.

Assim tem-se:

$$\delta = \delta_s + \delta_a + \delta_d \quad (3.44)$$

No caso de postes, os deslocamentos modais  $\Phi(y,z)$  associados à configuração do modo de vibração são constantes para cada altura  $z$ , pelo que o decremento logarítmico de amortecimento aerodinâmico,  $\delta_a$ , para as vibrações na direção do vento pode ser estimado através da equação seguinte:

$$\delta_a = \frac{c_f \cdot \rho \cdot b \cdot v_m(z_s)}{2 \cdot n_1 \cdot m_e} \quad (3.45)$$

onde:

$c_f$  – Coeficiente de força para a ação do vento na direção da ação definido em 3.1.8;

$\rho$  – Densidade do ar, igual a 1,25kg/m<sup>3</sup>;

$n_1$  – Frequência natural de vibração do primeiro modo (Hz);

$v_m$  – Velocidade média do vento (m/s);

$m_e$  – Massa equivalente por unidade de comprimento da estrutura (Kg/m), sendo esta definida por:

$$m_e = \frac{\int_0^h m(z) \cdot \Phi_1^2(z) dz}{\int_0^h \Phi_1^2(z) dz} \quad (3.46)$$

em que:

$\Phi_1$  – É a função de forma para o primeiro modo de vibração. Tratando-se a estrutura em análise de um elemento em consola, o modo fundamental de vibração pode ser obtido pela expressão proposta pela Norma [90]:

$$\Phi_1(z) = \left(\frac{z}{h}\right)^\xi \quad (3.47)$$

onde:

$\xi$  – Igual a 2,0 para torres/mastros e chaminés.

### 3.1.10 VORTEX SHEDDING

O fenómeno de “Vortex Shedding” ou partilha de vórtices consiste na formação de turbilhões no escoamento, designados por turbilhões de *von Kármán*, a jusante de uma estrutura aquando de uma velocidade crítica do vento, isto é, para um número de Reynolds crítico [94].

Estes turbilhões formam-se alternadamente em lados opostos da estrutura originando ações perpendiculares à direção do vento (Figura 3.13). Se as frequências de partilha de vórtices em torno da estrutura forem próximas da frequência natural da mesma podem ocorrer oscilações ressonantes e fenómenos dinâmicos importantes [95].



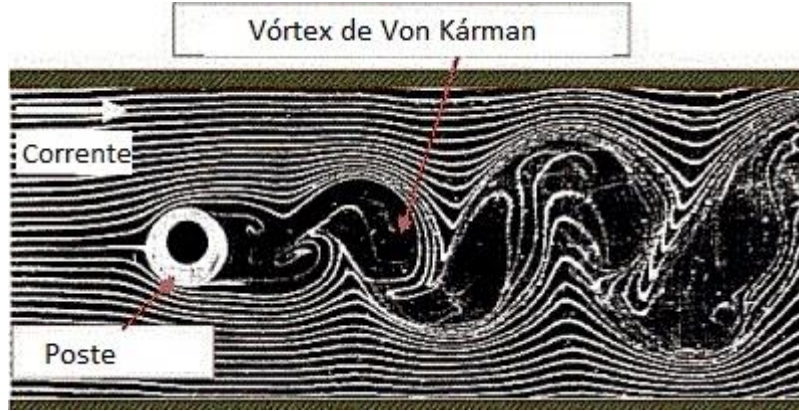


Figura 3.13 - Fenómeno de "Vortex Shedding" [96]

O Eurocódigo [90] permite calcular a velocidade crítica,  $v_{crf,i}$ , para o qual ocorre vibrações transversais ressonantes na estrutura devido a este fenómeno através da equação (3.48):

$$v_{crf,i} = \frac{b \cdot n_{i,y}}{St} \quad (3.48)$$

onde:

$b$  – Diâmetro exterior da secção ao nível em análise;

$n_{i,y}$  – Frequência própria do modo  $i$  de vibração em flexão na direção transversal ao vento;

$St$  – Número de Strouhal, igual a 0,18 para secções circulares.

Esta velocidade crítica,  $v_{crf,i}$ , deverá ser 25% superior à velocidade média do vento,  $v_m(z)$ , na altura onde é suscetível de ocorrer a formação de vórtices.

Assim, tem-se:

$$v_{crf,i}(z) > 1,25 \cdot v_m(z) \quad (3.49)$$

Sempre que a condição anterior não se verifique é necessário criar uma força de inércia,  $F_w(s)$ , na direção perpendicular à direção principal de propagação do vento:

$$F_w(s) = m(s) \cdot (2 \cdot \pi \cdot n_{i,y})^2 \cdot \phi_{i,y}(s) \cdot y_{F,máx} \quad (3.50)$$

em que:

$m(s)$  – Massa oscilante da estrutura por metro linear;

$\phi_{i,y}(s)$  – Função de forma, normalizada à unidade no ponto de maior deslocamento. Calculada pela expressão (3.47);

$y_{F,máx}$  – Deslocamento máximo, ao longo do tempo, do ponto com  $\phi_{i,y}(s) = 1$ .

O capítulo 1.5.3 do Eurocódigo EN 1991-1-4 [90] possui o procedimento para o cálculo do deslocamento máximo ( $Y_{f,máx}$ ) e que é apresentado de seguida:

$$Y_{F,máx} = \sigma_y \cdot k_p \quad (3.51)$$

com:

$k_p$  – Fator de pico, definido por:

$$k_p = \sqrt{2} \cdot \left[ 1 + 1,2 \cdot \arctan \left( 0,75 \cdot \left( \frac{Sc}{4 \cdot \pi \cdot K_a} \right)^4 \right) \right] \quad (3.52)$$

$\sigma_y$  – Desvio padrão do deslocamento, calculado pela expressão (3.53):

$$\frac{\sigma_y}{b} = \frac{1}{St^2} \cdot \frac{C_c}{\sqrt{\frac{Sc}{4 \cdot \pi} K_a \left( 1 - \left( \frac{\sigma_y}{b \cdot a_L} \right)^2 \right)}} \cdot \sqrt{\frac{\rho \cdot b^2}{m_e}} \cdot \sqrt{\frac{b}{h}} \quad (3.53)$$

onde:

$C_c$  – Coeficiente aerodinâmico que depende da forma da secção transversal e do número de Reynolds;

$K_a$  – Coeficiente de amortecimento dinâmico;

$a_L$  – Amplitude dinâmica normalizada para estruturas de baixo amortecimento;

$St$  – Número de Strouhal definido em (3.48);

$Sc$  – Número de Scruton calculado na expressão (3.62);

$\rho$  – Densidade do ar, igual a 1,25kg/m<sup>3</sup>;

$m_e$  – Massa efetiva por unidade de comprimento, definido em (3.46);

$h$  – Altura da construção;

$b$  – Largura da estrutura no ponto de maior deslocamento. No caso de estudo este parâmetro corresponde ao topo da edificação.

Para o cálculo do coeficiente aerodinâmico, coeficiente de amortecimento e amplitude dinâmica,  $C_c$ ,  $K_a$  e  $a_L$ , respetivamente, o Eurocódigo [90] propõe, para secções circulares, os valores apresentados no Quadro 3.4:

Quadro 3.4 - Valores de  $C_c$ ,  $K_a$  e  $a_L$  [90]

Parâmetro	$Re (v_{crít}) \leq 10^5$	$Re (v_{crít}) = 10^5$	$Re (v_{crít}) > 10^6$
$C_c$	0,02	0,005	0,01
$K_{a, máx}$	2	0,5	1
$a_L$	0,4	0,4	0,4

No caso de cilindros de base circular, admite-se que os coeficientes  $C_c$  e  $K_{a, \text{máx}}$  variam linearmente com o logaritmo do número de Reynolds para  $10^5 < Re < 5 \cdot 10^5$  e para  $5 \cdot 10^5 < Re < 10^6$ .

Para o coeficiente aerodinâmico,  $C_c$ :

$$C_c = 0,02 \quad \text{para } Re(v_{\text{crít}}) \leq 10^5 \quad (3.54)$$

$$C_c = \ln\left(\frac{Re(v_{\text{crít}})}{10^5}\right) \cdot \frac{(0,005-0,02)}{\ln(5)} + 0,02 \quad \text{para } 10^5 < Re(v_{\text{crít}}) \leq 5 \cdot 10^5 \quad (3.55)$$

$$C_c = \ln\left(\frac{Re(v_{\text{crít}})}{10^5}\right) \cdot \frac{(0,01-0,005)}{\ln(2)} + 0,005 \quad \text{para } 5 \cdot 10^5 < Re(v_{\text{crít}}) \leq 10^6 \quad (3.56)$$

$$C_c = 0,01 \quad \text{para } Re(v_{\text{crít}}) \geq 10^6 \quad (3.57)$$

Para o amortecimento aerodinâmico,  $K_a$ :

$$K_{a, \text{máx}} = 2 \quad \text{para } Re(v_{\text{crít}}) \leq 10^5 \quad (3.58)$$

$$K_{a, \text{máx}} = \ln\left(\frac{Re(v_{\text{crít}})}{10^5}\right) \cdot \frac{(0,5-2)}{\ln(5)} + 2 \quad \text{para } 10^5 < Re(v_{\text{crít}}) \leq 5 \cdot 10^5 \quad (3.59)$$

$$K_{a, \text{máx}} = \ln\left(\frac{Re(v_{\text{crít}})}{10^5}\right) \cdot \frac{(1-0,5)}{\ln(2)} + 0,5 \quad \text{para } 5 \cdot 10^5 < Re(v_{\text{crít}}) \leq 10^6 \quad (3.60)$$

$$K_{a, \text{máx}} = 1 \quad \text{para } Re(v_{\text{crít}}) \geq 10^6 \quad (3.61)$$

O número de Scruton,  $Sc$ , traduz a suscetibilidade da estrutura às vibrações e depende do amortecimento estrutural e a massa associada ao fluido. Este fator é obtido pela equação (3.62):

$$Sc = \frac{2 \cdot \delta_s \cdot m_e}{\rho \cdot b^2} \quad (3.62)$$

em que:

$\delta_s$  – Amortecimento estrutural, expresso pelo decremento logarítmico;

$\rho$  – Massa volúmica do ar nas condições de desprendimento de vórtices, igual a 1,25 kg/m<sup>3</sup>;

$m_e$  – Massa equivalente por unidade de comprimento para o 1º modo de vibração;

$b$  – Diâmetro da secção transversal na qual ocorre desprendimento de vórtices em ressonância.

Alternativamente e segundo Barros [94] existe um método mais simplificado para o cálculo das forças aerodinâmicas que se desenvolvem durante as oscilações em ressonância resultantes do efeito de partilha de vórtices. Zar e Chu [97] propõem a seguinte equação para a determinação destas forças laterais:

$$F_w(s) = \frac{1}{2 \cdot \xi} \cdot c_L \cdot D \cdot q_{cr} \quad (3.63)$$

onde:

$\xi$  – Fator de amortecimento crítico. Barros [94] considera  $\xi$  igual a 1,6%;

$c_L$  – Coeficiente de sustentação de *von Kármán*, igual a 0,2 para secções circulares;

$D$  – Diâmetro exterior da secção onde podem ocorrer os vórtices;

$q_{cr}$  – Sobrecarga dinâmica crítica devido ao vento (aplicada como pseudo-estática), calculada pela expressão:

$$q_{cr} = 0,613 \cdot (v_{crít})^2 \quad (3.64)$$

### 3.1.11 FENÓMENO DE "OVALING"

O fenómeno de "Ovalling" consiste na ovalização de secções devido à partilha de vórtices. Os mastros/postes de secção circular podem ter vibrações de flexão no plano das secções causando a sua ovalização (Figura 3.14) [94]. Apesar do Eurocódigo EN 1991-1-4 [90] permitir analisar a existência do fenómeno de ovalização não fornece nenhum método para calcular possíveis forças equivalentes. Deste modo apenas é possível proceder a uma verificação de segurança relativamente ao seu aparecimento.

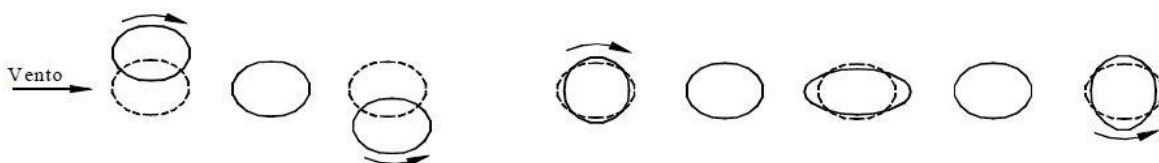


Figura 3.14 - Fenómeno de "Ovalling" [94]

De acordo com o Eurocódigo [90], a velocidade crítica do vento para o modo de vibração por ovalização  $i$  em cascas cilíndricas, é definida como a velocidade do vento para a qual o dobro da frequência de desprendimento de vórtices é igual à frequência própria do modo de ovalização  $i$  da casca cilíndrica.

A velocidade crítica de ovalização,  $v_{ov\ crít,i}$ , é então dada por:

$$n_{i,o} = 2 \cdot n_{i,y} \Leftrightarrow v_{ov\ crít,i} = \frac{b \cdot n_{i,o}}{2 \cdot St} \quad (3.65)$$

em que:

$b$  – Diâmetro exterior da secção;

$St$  – Número de Strouhal, igual a 0,18 para secções circulares;

$n_{i,o}$  – Frequência própria do modo de ovalização  $i$  da casca.

A Norma [90] indica que para que o fenómeno de ovalização não ocorra é necessário que:

$$v_{ov\ crit,i}(z) > 1,25 \cdot v_m(z) \quad (3.66)$$

A frequência fundamental de ovalização,  $n_{1,0}$ , de secções cilíndricas sem anéis de rigidez pode ser calculada através da expressão seguinte:

$$n_{1,0} = 0,492 \cdot \sqrt{\frac{t^3 \cdot E}{\mu_s \cdot (1-\nu^2) \cdot b^4}} \quad (3.67)$$

com:

$E$  – Módulo de Young do aço, em N/m<sup>2</sup>;

$t$  – Espessura da secção;

$\nu$  – Coeficiente de Poisson;

$\mu_s$  – Massa da casca por metro quadrado, em Kg/m<sup>2</sup>;

$b$  – Diâmetro da casca, em metros.

De acordo com Barros [94], a frequência fundamental de ovalização,  $n_{1,0}$ , para secções circulares pode ser determinada por uma outra metodologia proposta por Zar e Chu [97]:

$$n_{1,0} = 175,4 \cdot \frac{t \cdot \sqrt{E}}{D^2} \quad (3.68)$$

sendo:

$E$  – Módulo de Young do aço, em N/m<sup>2</sup>;

$t$  – Espessura da secção;

$D$  – Diâmetro exterior da secção onde podem ocorrer os vórtices;

Segundo Antunes [91], a diferença entre ambos os procedimentos é cerca de 5%, sendo a mais conservativa a expressão de Zar e Chu [97] uma vez que conduz a velocidades críticas mais baixas.

### 3.2 AÇÃO DOS CABOS

Para além do efeito do vento no poste é necessário contabilizar as ações provenientes dos cabos elétricos que o mesmo suporta. Estas ações são fundamentais para o dimensionamento dos postes, mas não é objetivo deste trabalho a sua quantificação. As mesmas serão incluídas no estudo como forças concentradas presentes nas extremidades dos vários braços que o poste de suporte possui.

Segundo Guimarães [98] os esforços transmitidos pelos cabos ao poste de suporte podem ser de várias naturezas:

- Peso próprio dos cabos;
- Ação do vento sobre os cabos;
- Variação de temperatura dos cabos;
- Forças de desvio em apoios de ângulo;
- Forças de amarração em apoios terminais;
- Rebentamento de cabos – ação de tipo acidental;
- Ação do gelo acumulado, em casos eventuais.

Para além dos agentes atmosféricos já mencionados, a chuva forte também pode provocar algumas oscilações dinâmicas verticais nos cabos. Contudo, estes movimentos são de pequena intensidade pelo que são habitualmente desprezados.

Em ambientes quentes a temperatura incita a uma dilatação nos cabos ao longo do seu comprimento e em ambientes frios ocorre a retração dos mesmos. No entanto, segundo Dias [99], estes efeitos de variação de comprimento são acomodados por dispositivos de folga presentes nas ligações das linhas aos braços de suporte pelo que os esforços axiais daí resultantes são pouco significativos e geralmente desprezados.

A força do vento sobre as linhas de transmissão é um dos principais efeitos que mais provoca esforços sobre os postes de apoio. A sua variabilidade da direção de incidência bem como as grandes velocidades que é capaz de atingir pode originar movimentos longitudinais, verticais e horizontais nos cabos passíveis de grandes amplitudes.

Aquando de ambientes frígidos (por exemplo em grandes altitudes) as temperaturas baixas podem levar a que a água proveniente da chuva ou neve se agregue na superfície dos cabos sob a forma de gelo. Este efeito provoca um aumento da massa dos próprios cabos o que implica um aumento considerável da força de conexão da linha na estrutura de suporte. Com o acumular de gelo os cabos de seção circular adquirem um aumento de volume e uma forma alongada vertical (semelhante a estalactites) o que aumenta a sua área de exposição lateral e consequentemente as forças transmitidas ao poste devido ao vento.

Fora das ações atmosféricas é fundamental considerar os esforços provenientes da instalação e manutenção das linhas devido aos equipamentos e presença e ação humana. De acordo com Fuchs [100], “os cabos podem ser solicitados por forças adicionais, como aquelas decorrentes do seu pré-tensionamento, e por cargas verticais concentradas, como aquelas decorrentes dos carrinhos de linha, ocupados por operários, e que deslizam pelos condutores. São sobrecargas possíveis de ocorrer e seus efeitos devem ser previstos”.

O peso próprio dos cabos compõe a ação permanente principal. As linhas de transmissão, compostas por cabos, quando suspensas entre dois pontos suficientemente elevados para que não se apoiem sobre o solo, adquirem a forma de catenárias [100]. Os pontos de suporte podem estar a alturas semelhantes ou, como ocorre mais frequentemente, a alturas diferentes. Este facto tem importância para se determinar as forças exercidas pelos cabos na estrutura. Na Figura 3.15, representa-se uma catenária sobre ação de uma força genérica:

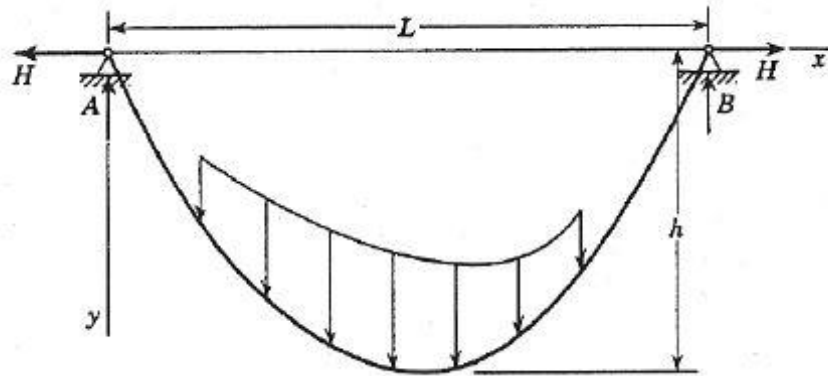


Figura 3.15 - Diagrama de forças de uma catenária [99]

A configuração da deformada da catenária submetida a uma carga distribuída,  $p$ , pode ser expressa através da seguinte equação:

$$v = -\frac{H}{p} \cdot \left[ \cosh \left( \frac{p \cdot (L - 2 \cdot x)}{2 \cdot H} \right) - \cosh \left( \frac{p \cdot L}{2 \cdot H} \right) \right] \quad (3.69)$$

onde:

$v$  – Distância à corda;

$p$  – Peso próprio do cabo;

$L$  – Distância entre apoios (vão);

$H$  – Reação horizontal sobre os apoios.

A flecha máxima da catenária,  $h$ , pode ser deduzida através da expressão (3.69) obtendo-se a equação:

$$h = \frac{H}{p} \cdot \left[ \cosh \left( \frac{p \cdot L}{2 \cdot H} \right) \right] \quad (3.70)$$

Conhecidos o peso próprio do cabo,  $p$ , o vão,  $L$ , e a flecha máxima,  $h$ , é então possível calcular o valor da reação horizontal,  $H$ , em cada apoio, através da resolução numérica da equação não linear (3.70) de forma iterativa.

Como o carregamento permanente é simétrico, as reações verticais  $A$  e  $B$  são iguais e totalizam o valor total da carga vertical,  $P$ :

$$A + B = P \quad (3.71)$$

Os valores da carga total vertical,  $P$ , e o comprimento da catenária,  $s$ , são calculados pelas seguintes equações respetivamente:

$$P = \frac{2 \cdot p^2}{H} \cdot \left[ \sinh \left( \frac{p \cdot L}{2 \cdot H} \right) \right] \quad (3.72)$$

$$s = \frac{2 \cdot p}{H} \cdot \left[ \sinh \left( \frac{p \cdot L}{2 \cdot H} \right) \right] \quad (3.73)$$

Por fim, é possível obter o esforço axial de tração resultante no cabo,  $N_s$ , através da expressão (3.74) (Figura 3.16).

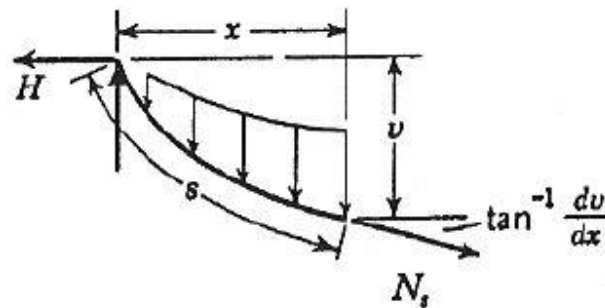


Figura 3.16 - Diagrama de forças num apoio da catenária [99]

$$N_s = H \cdot \left[ \cosh \left( \frac{p \cdot (L - 2 \cdot x)}{2 \cdot H} \right) \right] \quad (3.74)$$

Desta forma, é possível calcular as forças de reação concentradas a serem aplicadas nas extremidades dos braços existentes em cada nível do poste.

A variabilidade ao longo do tempo da direção, sentido e valor destas forças concentradas nos suportes dependem maioritariamente da velocidade e ângulo de incidência do vento e do efeito deste em conjunto com as forças gravíticas (peso próprio e gelo) e forças de inércia devido ao movimento dos cabos.

A Norma EN 50341-1 [101] define todos os cálculos e combinações a serem utilizados para dimensionamento de estruturas de transmissão. Estas combinações envolvem inúmeras variáveis como as distintas direções de incidência do vento e diferentes hipóteses de carregamento nos pontos de ligação dos cabos com a estrutura.

No dimensionamento dos postes de transmissão presentes neste trabalho foi utilizado um caso real de forças concentradas equivalentes às ações dos cabos, gentilmente facultado pela empresa Metalgalva.



### 3.3 AÇÃO DO GELO

Em mastros tubulares a ação do gelo deve ser incluída nos efeitos gravitacionais e nos efeitos sobre a ação do vento, uma vez que provocará uma maior área de exposição da própria estrutura e dos elementos que esta suporta.

A presença do gelo origina um acréscimo de peso na estrutura e consequentemente um aumento do esforço axial pelo que terá de ser contabilizado no dimensionamento.

Quaisquer informações relativas ao carregamento do gelo, bem como a combinação da ação do vento com a ação do gelo estão caracterizadas na EN 1993-3-1 [73] e na ISO 12494 [102].

A quantidade, densidade, a colocação e a forma do gelo nas estruturas depende fortemente das condições meteorológicas locais, da topografia e da configuração da estrutura.

O gelo atmosférico é classificado de acordo com o seu processo de formação:

- Gelo em nuvem;
- Gelo de precipitação.

Através destes dois grupos podem formar-se outros tipos de gelo tais como:

- Geadas macias;
- Geadas rígidas;
- Neve molhada;
- Esmalte.

Cada género possui propriedades físicas próprias e distintas a nível de densidade, coesão, adesão, cor e forma tal como se apresenta no Quadro 3.5:

Quadro 3.5 - Propriedades dos diferentes tipos de gelo [102]

Tipo de gelo	Densidade (Kg/m <sup>3</sup> )	Aderência e coesão	Aparência	
			Cor	Forma
Geadas macias	200 a 600	Baixa a média	Branca	Excêntrica
Geadas rígidas	600 a 900	Forte	Opaca	Excêntrica
Neve molhada	300 a 600	Fraca (formação) Forte (congelada)	Branca	Uniformemente distribuída/excêntrica
Esmalte	900	Forte	Transparente	Uniformemente distribuída/estalactites

Durante a fase de projeto e dimensionamento é habitualmente considerado que todos os elementos constituintes da estrutura são cobertos por uma espessura uniforme de gelo, que juntamente com a sua densidade própria, permitem o cálculo do peso do gelo bem como o aumento da área de exposição ao vento.

Estas simplificações fazem sentido em locais onde se formam os tipos de gelo esmalte e neve molhada mas caso haja formação de geada a realidade física não corresponde à formação de uma camada uniforme de gelo sobre a estrutura. Contudo, em zonas onde a quantidade de geada depositada é reduzida, o método de dimensionamento (para o cálculo do peso do gelo e do acréscimo do efeito do vento) pode assumir uma espessura uniforme de gelo desde que os valores utilizados sejam conservativos.

No sentido de se apurar a quantidade de gelo passível de se formar em determinada zona, foi introduzido o termo de classe do gelo (IC). Este parâmetro permite determinar a severidade do acréscimo de gelo para um determinado local. No Quadro 3.6 observa-se o IC para o tipo de gelo esmalte:

Quadro 3.6 - Classes para o gelo do tipo esmalte [102]

Densidade do gelo = 900 Kg/m <sup>3</sup>					
IC	Espessura, $t$ (mm)	Massa do esmalte, $m$ (Kg/m)			
		Diâmetro do cilindro (mm)			
		10	30	100	300
G1	10	0,6	1,1	3,1	8,6
G2	20	1,7	2,8	6,80	18,1
G3	30	3,4	5,1	11	28
G4	40	5,7	7,9	15,8	38,5
G5	50	8,5	11,3	21,2	49,5
G6	A ser utilizada para acréscimos de gelo extremos				

Recorrendo aos valores do Quadro 3.6 e à Figura 3.17 é possível avaliar a massa de gelo através da área acrescida de gelo no corte da secção transversal multiplicada pela sua densidade.

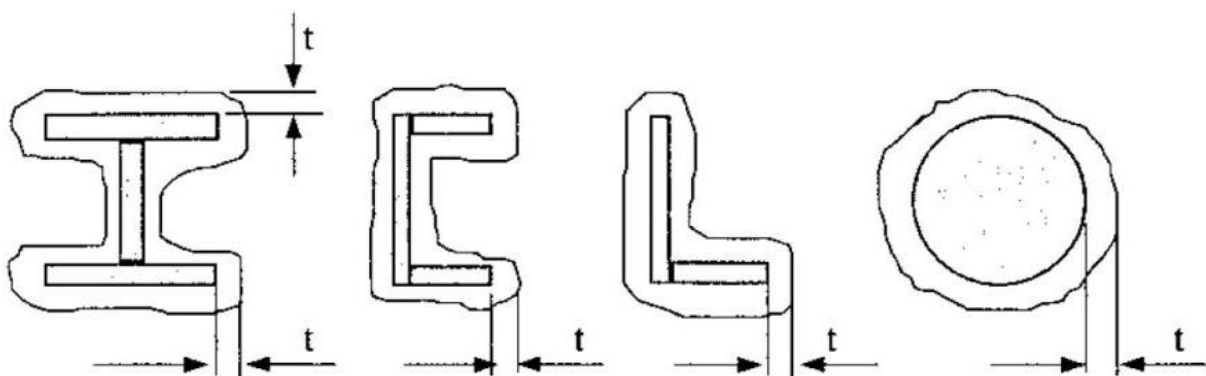


Figura 3.17 - Modelo de deposição do gelo de tipo esmalte [102]

### 3.4 AÇÃO DA TEMPERATURA

Qualquer estrutura fabricada com aço apresenta uma grande sensibilidade às variações de temperatura já que o aquecimento ou arrefecimento dos materiais metálicos provoca uma dilatação considerável em volume e retração respetivamente.

Podem ser considerados na análise estrutural dois tipos de variação termal:

- Variações uniformes de temperatura;
- Variações diferenciais de temperatura.

As primeiras estão associadas às variações anuais e locais da temperatura ambiente e processam-se de forma lenta e com um carácter homogéneo em altura (de modo geral).

Desprezando o efeito dos cabos condutores, os postes de transmissão são estruturas em consola e isostáticas pelo que um aumento de temperatura uniforme ao longo do seu perímetro e altura apenas provoca deformações. Na realidade a presença das linhas de transmissão no topo incita um certo grau de hipers-taticidade na estrutura o que leva a uma reduzida restrição das suas deformações térmicas e consequentemente origina pequenos esforços axiais.

No segundo caso, as variações diferenciais de temperatura resultam sobretudo das variações rápidas da temperatura ambiente ao longo do dia. A exposição da estrutura ao Sol pode causar uma diferença térmica considerável [103] entre o semi-perímetro da secção exposto à luz solar e o restante à sombra. Este aquecimento diferencial vai originar tensões verticais e circunferenciais de onde surgem esforços nos postes que podem rapidamente conduzir à deformação por flexão da estrutura [104] como ilustrado na Figura 3.18.

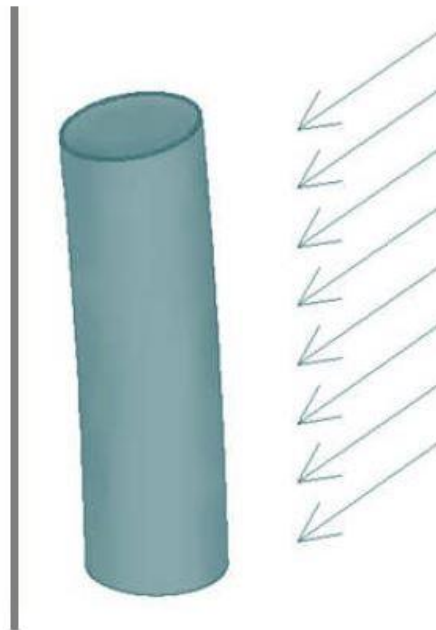


Figura 3.18 - Efeito da radiação solar sobre o fuste do poste [81]

Segundo Antunes [91] têm sido reportados problemas com mastros de suporte de telecomunicações até 50 metros que sofrem deslocamentos no topo segundo a horizontal com cerca de 20 a 30 cm.

Nos postes de transmissão estas deformações no cume são levemente impedidas na medida em que aumentam as distâncias pré-definidas entre os apoios dos cabos condutores obrigando-os a subir e a diminuir a sua flecha (na configuração de catenária) originando esforços extras nos postes.

Todavia, este efeito apenas advém quando postes consecutivos sofrem aquecimentos diferenciais no fuste distintos, como por exemplo, quando um poste se encontra localizado numa zona de sombra enquanto o adjacente permanece exposto à luz solar. No caso em que todos os mastros se encontram igualmente expostos ao Sol este efeito é bastante reduzido já que todos possuem deslocamentos análogos e no mesmo sentido.

Deste modo, é essencial ter em consideração, durante o dimensionamento, a localização da estrutura (já que o diferencial máximo de temperatura entre a luz solar e a sombra está intimamente relacionada com a região onde se encontra) e obstáculos passíveis de provocar variações de temperatura distintas em postes vizinhos.

Uma forma de atenuar o efeito do aquecimento por luz solar é pintar a superfície da torre com cores claras por forma a diminuir a absorção da radiação solar e aumentar a sua reflexão.

### 3.5 AÇÃO SÍSMICA

Esta ação deve ser sempre avaliada e averiguada aquando o dimensionamento de postes de transmissão nomeadamente em zonas de grande atividade sísmica. Porém, como já mencionado no Capítulo 2, esta ação raramente é condicionante (em paralelo com a ação do vento) devido à baixa massa das estruturas.

Assim, não é objetivo do atual trabalho a sua explicação e análise pelo que apenas se expõe algumas regras para a sua aplicação aos postes de transmissão.

Conforme a Norma 50341-1 [101] indica, “a análise sísmica pode incluir o período natural de vibração da estrutura, o fator de ressonância (dependendo das condições do solo), e a altura, peso e a distribuição da massa da estrutura de suporte. Uma vez que a frequência do apoio é maior do que a dos condutores, as cargas dinâmicas proveniente dos condutores, obviamente, não são significativas. Vice-versa, não é de esperar que haja efeitos importantes do apoio sobre os condutores”.

O cálculo sísmico deve ser executado em pormenor recorrendo às Normas EN 1998 [105] e EN 1998-6 [106]. Esta última expõe regras especiais para torres de transmissão elétrica:

- O projeto deve ter em conta os efeitos adversos sobre a torre dos cabos instalados entre torres adjacentes;
- A exigência anterior pode ser satisfeita se os efeitos da ação sísmica na estrutura da torre forem calculados por uma simples inclusão dos seguintes fatores (SRSS ou regras de combinação semelhantes não devem ser utilizadas):
  - Os efeitos da ação sísmica devido às forças exercidas pelos cabos sobre a torre, assumindo que a torre se move estaticamente e em concordância com as adjacências na direção mais adversa. O deslocamento relativo assumido deve ser igual ao dobro do deslocamento do solo de projeto especificado na EN 1998-1 [105]. Um grupo de todos os deslocamentos relativos e fisicamente possíveis entre torres deve ser analisado, sob a suposição de que as torres se encontram fixas na base;

- Os efeitos da ação sísmica devido aos esforços de inércia provenientes de uma análise dinâmica de acordo com 4.2.1 (2) da Norma em questão [106]. No modelo de três torres, uma suposição limitativa pode ser feita para duas torres adjacentes apenas se estas forem tangentes. Neste caso, as forças de inércia podem ser calculadas assumindo que a torre adjacente é elasticamente suportada ao nível dos cabos e na direção destes.

### 3.6 COMBINAÇÃO DE AÇÕES

A combinação de ações utilizada para o dimensionamento corresponde ao Estado Limite Último e baseia-se na expressão seguinte:

$$Q_{ed} = \gamma_G \cdot G_k + \gamma_w \cdot Q_{w,k} \quad (3.75)$$

em que:

$Q_{ed}$  – Valor de cálculo do esforço atuante;

$\gamma_G$  – Coeficiente de segurança relativo às ações permanentes;

$G_k$  – Valor característico das ações permanentes;

$\gamma_w$  – Coeficiente de segurança relativo às ações variáveis;

$Q_{w,k}$  – Valor característico das ações variáveis.

Com efeito, o caso mais condicionante engloba os seguintes valores característicos e respetivos fatores de segurança:

- $G_k$  – Esforço característico do peso próprio da estrutura, calculado através de uma densidade do aço igual a 7850kg/m<sup>3</sup> e varia, sobretudo, conforme o tipo de secção transversal escolhida e os diâmetros utilizados para o fuste já que a geometria dos braços se mantém constante ao longo da análise. Os pesos próprios de elementos auxiliares, como por exemplo possíveis escadas de acesso, não são considerados no projeto devido às suas reduzidas influências nas ações;
- $\gamma_k$  – Fator de segurança do peso próprio igual a 1,10 onde os 10% adicionais provêm de pequenas ligações e do peso aproximado da pintura e galvanização a aplicar no poste;
- $Q_{w,k}$  – Esforço característico da ação do vento sobre a estrutura na direção de propagação mais condicionante para o Estado Limite Último. Esta corresponde à direção transversal ao alinhamento dos cabos devido às grandes forças horizontais de arrastamento que neles provoca;
- $\gamma_w$  – Coeficiente de segurança da ação do vento igual a 1,4 sobre a estrutura e igual a 2,0 sobre os cabos de transmissão.

A combinação que abrange a presença do gelo não foi considerada para o Estado Limite Último já que os postes de transmissão deste estudo encontram-se numa zona costeira e ao nível do mar onde não existe formação de gelo.

Os critérios relativos ao Estado Limite de Serviço não se encontram definidos regulamentarmente mas o caderno de encargos por parte do cliente pode exigir algumas limitações.



# 4

## BASES DE PROJETO

### 4.1 INTRODUÇÃO

Para o projeto e dimensionamento de estruturas metálicas é fundamental satisfazer as várias disposições regulamentares presentes no Eurocódigo EN 1993 parte 1-1 (projeto de estruturas de aço – regras gerais e regras para edifícios) [30].

No caso de estudo presente, conceção de um poste metálico de transmissão elétrica em aço macio e em aço de alta resistência, as regras a cumprir estendem-se também a outros elementos bibliográficos de carácter mais específico nomeadamente:

- Norma EN 1993-1-5 – Projeto de estruturas de aço com elementos em placa [67];
- Norma EN 1993-1-10 – Tenacidade dos materiais e propriedades segundo a espessura [71];
- Norma EN 1993-1-12 – Regras adicionais para aços até S700 [72];
- Norma EN 1993-3-1 – Torres e mastros [73]
- Norma EN 1993-3-2 – Chaminés [74];
- Norma Europeia EN 50341-1 – Regras e especificações gerais para linhas elétricas superiores excedendo 45kV AC [101];
- Norma EN 1998-1: Projeto de estruturas para resistência aos sismos [105];
- Norma EN 1998-6: Projeto de estruturas para resistência aos sismos – Torres, mastros e chaminés [106].

Onde os principais temas abordados por estas diretrizes estão relacionados com:

- Classificação da estrutura, método de análise e incorporação de imperfeições;
- Verificações de segurança da estrutura;
- Particularização das regras gerais estipuladas na EN 1993-1-1 [30] para torres e mastros através da EN 1993-3-1 [73].

De um modo geral, a análise, o dimensionamento e a verificação de segurança de uma estrutura envolve uma série de fases que devem ser seguidas e consideradas adaptando-se sempre ao caso de estudo. Segundo Camotim [107] estas etapas globais são as que se identificam de seguida:

- Classificação da estrutura
  - Contabilização dos efeitos de 2ª ordem
    - Suscetível aos efeitos de 2ª ordem
    - Não suscetível aos efeitos de 2ª ordem
  - Classificação das secções dos elementos constituintes
    - Classe 1
    - Classe 2
    - Classe 3
    - Classe 4
  - Classificação das ligações
    - Rigidez
    - Resistência
- Consideração das imperfeições geométricas
  - Globais
  - Locais
  - Forças equivalentes às imperfeições
- Escolha do método de análise
  - Análise elástica
  - Análise plástica
    - Elasto - Plástica
    - Plástica não linear
    - Rígido - Plástica
- Cálculo de esforços de dimensionamento
  - Análise de 1ª ordem (geometricamente linear)
  - Análise de 2ª ordem
- Verificação de estabilidade do pórtico
- Verificação de segurança dos elementos
  - Secções (tensões diretas)
  - Barras (fenómenos de instabilidade)
- Verificação de segurança das ligações
  - Ligações aparafusadas
  - Ligações soldadas
- Verificação da deformabilidade da estrutura (estados limites de utilização, nomeadamente no que diz respeito a deslocamentos e vibrações)



No presente capítulo aborda-se e descreve-se as etapas mais influentes para as bases de análise estrutural para um projeto de torres de transmissão.

#### 4.2 EFEITOS DE SEGUNDA ORDEM E ANÁLISE NÃO LINEAR GEOMÉTRICA

Todos os deslocamentos e esforços internos obtidos (devido às forças atuantes) numa análise de equilíbrio da estrutura a partir da sua geometria inicial, sem qualquer tipo de deformação, designam-se por efeitos de primeira ordem [108].

No entanto, sempre que há esforços há sempre deformações inerentes pelo que este tipo de abordagem não é inteiramente correta. Assim, é necessário incorporar à análise de primeira ordem os efeitos resultantes da consideração da configuração deformada da estrutura aquando a análise de equilíbrio – efeitos de segunda ordem.

Quanto mais flexível e esbelta for a estrutura mais suscetível e mais importante é a consideração deste fenómeno. A consideração dos efeitos de segunda ordem conduz a uma não linearidade entre ações e deformações (análise não linear geométrica) e o seu agravamento ocorre devido aos efeitos adicionais que as ações existentes provocam nas deformações prévias da estrutura [109].

De forma análoga apresenta-se o seguinte exemplo aplicado a postes:

- Um poste encastrado na base e sujeito a um esforço axial devido ao peso próprio e a uma força horizontal devido ao vento origina um momento fletor na sua base e uma ligeira deformação – efeito de primeira ordem (Figura 4.1)

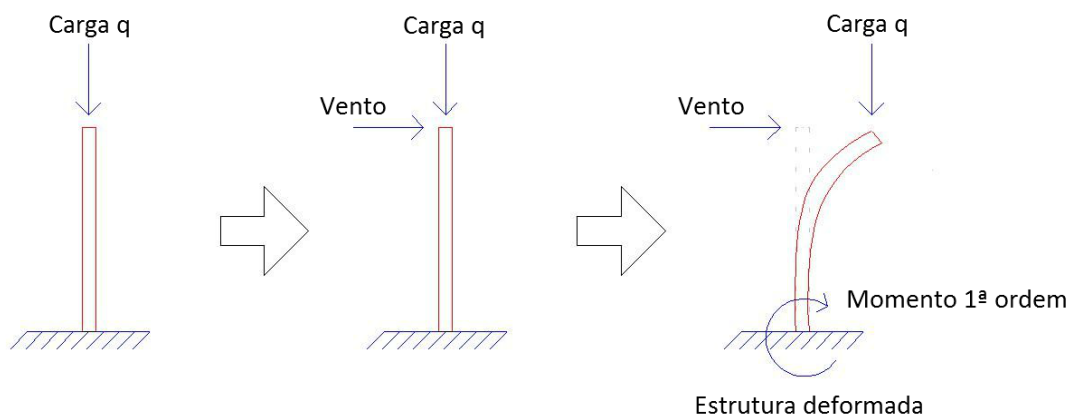


Figura 4.1 - Efeito de primeira ordem num poste (adaptado) [110]

- Contudo, as mesmas cargas aplicadas sobre a estrutura, agora deformada, provocam um momento adicional de segunda ordem que resulta do carregamento multiplicado pelas excentricidades da deformada anterior (Figura 4.2)

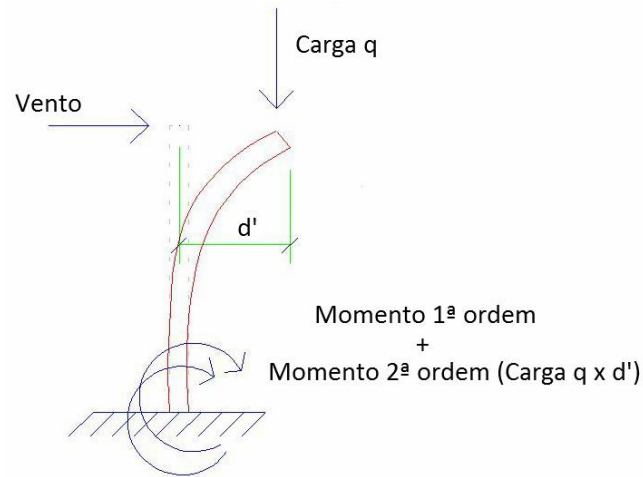


Figura 4.2 - Efeito de segunda ordem num poste (adaptado) [110]

- Existe assim um processo iterativo que termina quando o acréscimo de deformação tender para zero ou for inferior a uma determinada tolerância. Caso não haja esta convergência a estrutura é considerada instável não sendo possível garantir a sua segurança (Figura 4.3)

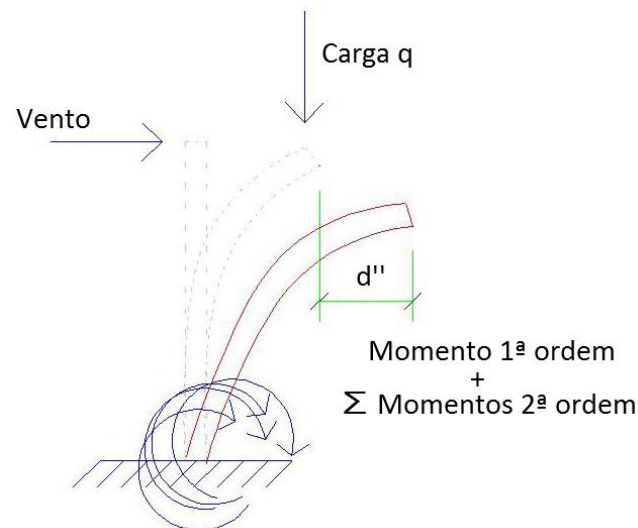


Figura 4.3 - Análise não linear geométrica (adaptado) [110]

A realização de uma análise não linear geométrica, por forma a incluir os efeitos de segunda ordem, deve ser sempre acautelada. A EN 1993-1-1 [30] indica que se pode realizar uma análise elástica linear, desprezando os efeitos de segunda ordem, se:

$$\alpha_{cr} = \frac{F_{cr}}{F_{ed}} \geq 10 \quad (4.1)$$

Onde:

$\alpha_{cr}$  - Fator pelo qual as ações de cálculo teriam de ser multiplicadas para provocar a instabilidade elástica num modo global;

$F_{cr}$  - Carga crítica associada à instabilidade global da estrutura, avaliada com base na rigidez elástica inicial;

$F_{ed}$  - Valor de cálculo do carregamento da estrutura.

Contudo, ambas as Normas EN 1993-1-1 [73] e EN 5034-1 [101] assinalam que a análise estrutural de mastros deve ser sempre não linear geométrica de modo a incluir os efeitos de segunda ordem.

No presente caso de estudo estes efeitos foram incluídos de forma simplificada no dimensionamento através da amplificação das forças horizontais por meio da expressão fornecida pela EN 1993-1-1 [30]:

$$\frac{1}{1 - \frac{1}{\alpha_{cr}}} \quad (4.2)$$

### 4.3 IMPERFEIÇÕES GEOMÉTRICAS

Em todas as construções realizadas, por mais cuidadosa que seja a sua execução, existem sempre imperfeições, defeitos e desvios geométricos que podem ser de várias naturezas como por exemplo:

- Falta de verticalidade, retilinearidade, de planura ou de ajustamento;
- Falta de linearidade dos eixos dos elementos constituintes;
- Tensões residuais e heterogeneidade dos materiais;
- Folgas;
- Excentricidades nas ligações;
- Excentricidades no ponto de aplicação das cargas.

Estas variações são responsáveis pela introdução de esforços adicionais e devem ser introduzidos na análise global aquando o dimensionamento das estruturas.

Por forma a considerar estes efeitos a EN 1993-1-1 [30] admite a simulação dos mesmos através de imperfeições geométricas equivalentes e distingue três grupos distintos:

- Imperfeições de natureza global, por exemplo a falta de verticalidade da estrutura;
- Imperfeições de natureza local, por exemplo, a falta de linearidade dos eixos dos elementos;
- Imperfeições do sistema de contraventamento.

Apesar de considerar formalmente que todas as imperfeições são de carácter geométrico os valores desta Norma são calibrados de modo a terem em conta a influência de todo o tipo de imperfeições reais como por exemplo as de índole material.

As imperfeições gerais são simuladas na análise global da estrutura através da introdução de uma inclinação inicial da mesma,  $\emptyset$ , no sentido mais desfavorável e calculada pela seguinte expressão:

$$\emptyset = \emptyset_0 \cdot \alpha_h \cdot \alpha_m \quad (4.3)$$

Em que:

$\emptyset_0$  – Valor de base igual a 1/200;

$\alpha_h$  – Coeficiente de redução, calculado em função da altura da estrutura,  $h$ , através da expressão (4.4).

$$\alpha_h = \frac{2}{\sqrt{h}} \quad \text{mas} \quad \frac{2}{3} \leq \alpha_h \leq 1,0 \quad (4.4)$$

Onde:

$\alpha_m$  – Coeficiente de redução, associado ao número de pilares submetidos a um esforço axial igual ou superior a 50% do valor médio,  $m$ , obtido por:

$$\alpha_m = \sqrt{0,5 \cdot \left(1 + \frac{1}{m}\right)} \quad (4.5)$$

Por forma a simplificar o método de análise a EN 1993-1-1 [30] permite que se substitua as imperfeições globais por sistemas de forças horizontais equivalentes (Figura 4.4).

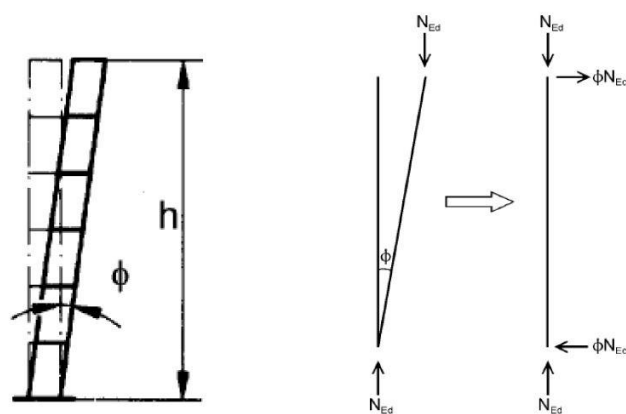


Figura 4.4 - Imperfeição global da estrutura,  $\emptyset$ , e forças equivalentes [30]

Deste modo, pode-se incluir um binário de forças laterais equivalentes de valor:

$$F_{equiv,h} = \emptyset \cdot N_{ed} \quad (4.6)$$

Onde:

$\emptyset$  – Inclinação inicial geral da estrutura;

$N_{ed}$  – Esforço axial de cálculo.

Contudo, em estruturas onde se verifique a condição  $H_{ed} \geq 0,15 \cdot V_{ed}$ , a diretriz em questão [30] possibilita o desprezo das imperfeições globais.

#### 4.4 MÉTODO DE ANÁLISE

Para além dos métodos de análise geométrica previamente referidos (linear ou não) as Normas em vigor permitem realizar a simulação e cálculo estrutural considerando o comportamento dos materiais através dos seguintes meios de análise:

- Análise global elástica;
- Análise global plástica
  - Elasto-plástica;
  - Plástica não linear;
  - Rígido-plástica.

Em qualquer uma destas hipóteses deve-se sempre assegurar as condições de equilíbrio e resistência sendo que as suas principais diferenças baseiam-se nas leis constitutivas adotadas para os materiais e nas condições de compatibilidade.

De acordo com a EN 1993-1-1 [30], a primeira pode ser utilizada para todos os casos e baseia-se na hipótese de existir uma relação tensão-deformação linear do material independentemente do nível de tensões atuantes. Os esforços podem ser calculados mesmo que a resistência das secções transversais se baseie na sua resistência plástica ou quando a esta é limitada pela encurvadura local.

A análise global plástica pode ser utilizada quando a estrutura pode redistribuir momentos fletores e quando possui uma capacidade de rotação suficiente nos locais críticos propícios a formar rótulas plásticas, tanto nos elementos como nas ligações. Este tipo de análise considera o comportamento não linear dos materiais no cálculo dos efeitos provocados pelas ações e pode ser modelado por um dos seguintes métodos:

- Análise elasto-plástica: onde as secções e/ou ligações plastificadas são modeladas como rótulas plásticas;
- Análise plástica não linear: é considerada a plastificação parcial dos elementos ao longo das zonas plásticas;
- Análise rígido-plástica: despreza-se o comportamento elástico dos troços dos elementos entre rótulas plásticas e pode ser aplicada quando se ignora os efeitos de segunda ordem.

No caso dos postes de transmissão ambas as Normas EN 1993-3-1 [73] e a EN 50341-1 [101] indicam que se deve adotar uma análise global elástica aquando o projeto e cálculo de esforços internos e momentos.

Para o caso dos aços apresentados pela EN 1993-1-12 (S460 a S700) [72] a análise global plástica não pode ser aplicada.

#### 4.5 CLASSIFICAÇÃO E RESISTÊNCIA DAS SECÇÕES

A classificação da secção transversal tem como função avaliar a sua resistência última e capacidade de rotação quando submetida a tensões normais, tendo em atenção possíveis fenómenos de encurvadura local da peça já que uma instabilização local pode resultar numa redução da capacidade resistente à flexão e compressão.

A EN 1993-1-1 [30] define quatro classes para as secções conforme a sua capacidade de rotação e formação de rótulas plásticas, apresentadas no Quadro 4.1

Quadro 4.1 - Classificação das secções [30]

Classificação das secções	
Classe 1	Secção em que se pode formar uma rótula plástica, com a capacidade de rotação necessária para uma análise plástica, sem redução da sua resistência
Classe 2	Secção em que podem atingir o momento resistente plástico, mas cuja capacidade de rotação é limitada pela encurvadura local
Classe 3	Secção em que a tensão na fibra extrema comprimida, calculada com base numa distribuição elástica de tensões, pode atingir o valor da tensão de cedência, mas em que a encurvadura local pode impedir que o momento resistente plástico seja atingido
Classe 4	Secção em que ocorre a encurvadura local antes de se atingir a tensão de cedência numa ou mais partes da secção transversal

O comportamento das secções descritas à flexão apresenta-se na Figura 4.5.

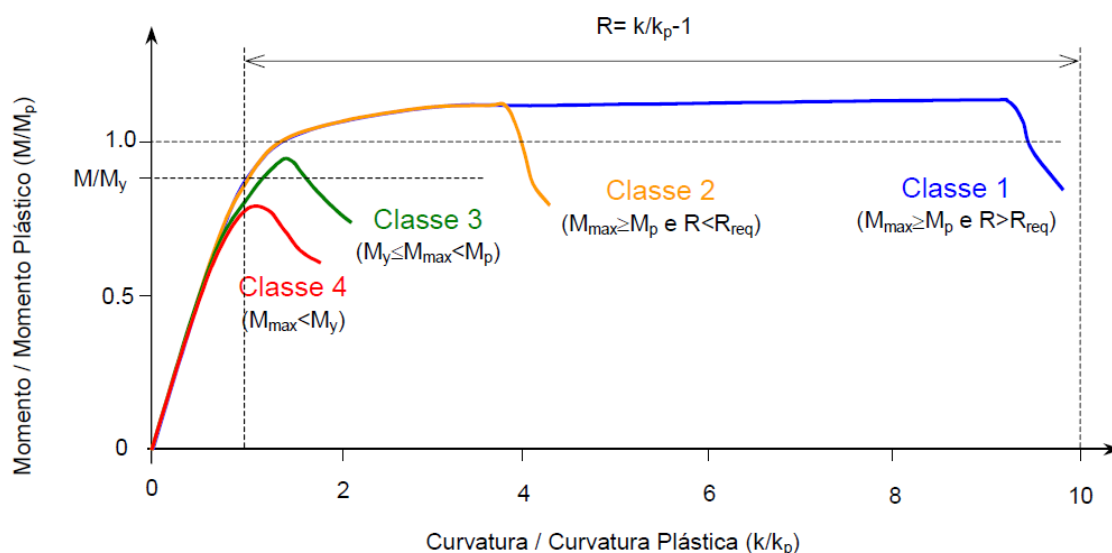


Figura 4.5 - Curvas momento-curvatura para as diversas classes de secção preconizadas pelo EC3 [99]

A Norma respeitante às linhas de transmissão elétrica, EN 50341-1 [101], aborda o tema da encurvadura local com base nas definições da EN 1993-1-1 [30] mas classifica as secções apenas de classe 3 ou 4. No seu Anexo K da EN 50341 existe um quadro que permite uma classificação direta das secções transversais constituintes de um mastro. A Figura 4.6 representa o quadro referido.

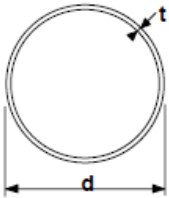
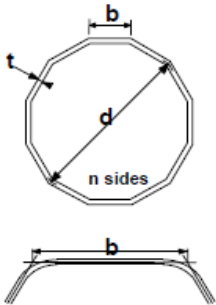
Type of section	Criteria for class 4
	$d/t > 176 \epsilon^2$
	<p>for n equal 6 to 18 sides</p> $b/t > 42 \epsilon$
<p>where <math>\epsilon = (235/f_y)^{0.5}</math> and <math>f_y</math> is the nominal value of the yield strength in <math>\text{N/mm}^2</math></p>	

Figura 4.6 - Classificação de secções transversais tubulares sujeitas a flexão [101]

## 4.6 ENCURVADURA

### 4.6.1 ENCURVADURA GLOBAL

Numa análise estrutural a falta de estabilidade e equilíbrio pode dever-se à falta de ligações externas ou à excessiva esbelteza das peças. Visto que as estruturas são especialmente concebidas para serem hiperstáticas, a instabilidade devido à esbelteza constitui um dos fatores mais relevantes para o projetista pelo que é necessária a sua avaliação e prevenção.

De acordo com Henriques [86], quando os elementos estruturais são submetidos a grandes esforços de compressão perdem estabilidade pela ocorrência de deformações transversais inevitáveis (Figura 4.7). Este fenómeno designa-se por encurvadura e consiste, de forma simplificada, num efeito de segunda ordem onde surgem desvios laterais e esforços de flexão devido aos esforços de compressão axial.

Já Calado [111] refere que a encurvadura pode ser um tipo de colapso resultante da instabilidade estrutural e que ocorre de modo inesperado e catastrófico.

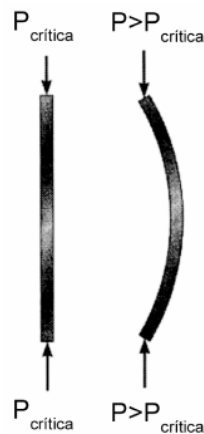


Figura 4.7 - Deformação lateral de um elemento esbelto submetido a uma carga de compressão,  $P$ , superior à crítica,  $P_{crítica}$  (encurvadura) [112]

A carga de compressão máxima a partir do qual o elemento começa a desenvolver deformações transversais (para além das axiais) designa-se por carga crítica,  $P_{crítica}$ , e é definida pela fórmula seguinte desenvolvida por Leonhard Euler:

$$P_{crítica} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{L^2} \quad (4.7)$$

Em que:

$E$  – Módulo de elasticidade do material;

$I$  – Momento de inércia da secção transversal em relação ao eixo perpendicular ao plano onde ocorre a deformação;

$L$  – Comprimento de encurvadura do elemento que depende das suas condições de apoio.

Esta expressão teórica baseia-se na consideração de um material com comportamento elástico linear, de uma peça sem imperfeições geométricas e tensões residuais e de um ponto de aplicação de cargas perfeitamente centrado no eixo do elemento.

Por outro lado, quando uma peça estrutural é pouco esbelta e/ou possui comprimento reduzido, a encurvadura perde influência e a sua capacidade resistente passa a ser delimitada pelo esmagamento do material constituinte (Figura 4.8).

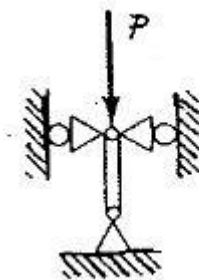


Figura 4.8 - Elemento cuja encurvadura é pouco preocupante [111]



Caso haja momentos fletores para além do esforço axial de compressão (flexão composta) a encurvadura ganha mais importância devido às deformações laterais iniciais originadas pela flexão o que provoca uma excentricidade na aplicação das cargas compressivas com consequente agravamento dos deslocamentos transversais (efeitos de segunda ordem).

A EN 1993-1-1 [30] possibilita o dimensionamento de elementos sujeitos à compressão simples através de curvas de encurvadura. Este método permite representar o efeito das imperfeições das peças (por exemplo a falta de linearidade, excentricidades das cargas e tensões residuais) substituindo as mesmas por uma configuração inicial deformada equivalente.

#### 4.6.2 ENCURVADURA LOCAL

Para além da encurvadura global da estrutura, citada no ponto anterior, pode existir o efeito de encurvadura local.

A encurvadura local, também já referida no subcapítulo 4.5, consiste numa perda de estabilidade pontual da secção transversal com consequente perda de capacidade resistente à compressão e flexão. Este fenómeno, que pode levar ao colapso estrutural (Figura 4.9), resulta de deformações transversais não desejadas e ocorre frequentemente em secções esbeltas e de espessura reduzida como é o caso de placas/perfis e secções poligonais ocas ou tubulares que formam os postes de transmissão.



Figura 4.9 - Colapso de uma torre eólica devido à encurvadura local [113]

Por forma a se garantir a segurança de cada secção é necessário determinar a sua classe (de acordo com subcapítulo 4.5) e calcular as suas resistências. Caso se trate de uma secção de classe 4 é necessário calcular as propriedades da secção efetiva por forma a ter em consideração as reduções de resistência devidas aos efeitos da encurvadura local como ilustra a Figura 4.10.

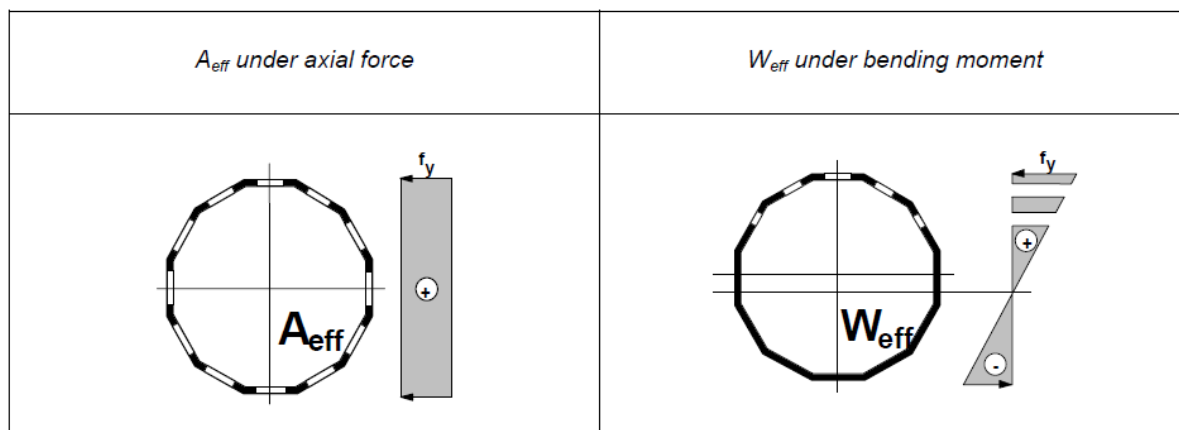


Figura 4.10 - Características da secção efetiva de classe 4 [101]

O cálculo de secções poligonais de classe 4 tem como base a Figura 4.11, correspondente à tabela 4.1 da EN 1993-1-5 [67], para elementos internos comprimidos e envolve uma redução da área bruta em cada face do polígono regular tal como a figura anterior exemplifica.β

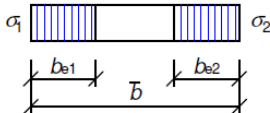
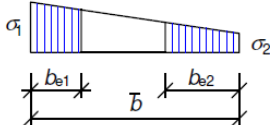
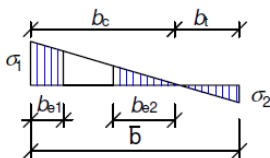
Stress distribution (compression positive)				Effective <sup>p</sup> width $b_{eff}$		
				$\underline{\psi = 1:}$ $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = 0,5 b_{eff} \quad b_{e2} = 0,5 b_{eff}$		
				$\underline{1 > \psi \geq 0:}$ $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = \frac{2}{5 - \psi} b_{eff} \quad b_{e2} = b_{eff} - b_{e1}$		
				$\underline{\psi < 0:}$ $b_{eff} = \rho b_c = \rho \bar{b} / (1 - \psi)$ $b_{e1} = 0,4 b_{eff} \quad b_{e2} = 0,6 b_{eff}$		
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1	$-1 > \psi > -3$
Buckling factor $k_\sigma$	4,0	$8,2 / (1,05 + \psi)$	7,81	$7,81 - 6,29\psi + 9,78\psi^2$	23,9	$5,98 (1 - \psi)^2$

Figura 4.11 - Tabela 4.1 da EN 1993-1-5 para elementos internos comprimidos [67]

Em que:

$$\sigma_i = \frac{N_{ed}}{A} + \frac{M_{ed,x}}{I_x} \cdot y_i + \frac{M_{ed,y}}{I_y} \cdot x_i \quad (4.8)$$

$$\lambda_p = \frac{\frac{b}{t}}{28,4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_\sigma}} \quad (4.9)$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y \text{ (MPa)}}} \quad (4.10)$$

$$\rho = \begin{cases} 1,0, \lambda_p \leq 0,673 \\ \frac{\lambda_p - 0,055 \cdot (3 + \psi)}{\lambda_p^2} \leq 1,0, \lambda_p > 0,673, \text{ onde } (3 + \psi) \geq 0 \end{cases} \quad (4.11)$$

Onde:

$b$  – Largura da face do polígono;

$t$  – Espessura do polígono;

$\lambda_p$  – Esbelteza da chapa ou face do polígono;

$\rho$  – Coeficiente de redução que depende da esbelteza da chapa  $\lambda_p$ .

Após a determinação da secção transversal reduzida é possível calcular a sua área e módulo de flexão efetivo ( $A_{\text{eff}}$  e  $W_{\text{eff}}$  respetivamente) o que permite contabilizar as suas resistências ( $N_{c,rk}$  e  $M_{c,rk}$ ).

#### 4.6.3 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS E MECÂNICAS DE SECÇÕES POLIGONAIS

No âmbito deste trabalho desenvolveu-se uma aplicação informática capaz de calcular automaticamente a resistência ao esforço axial e à flexão simples de secções poligonais de classe 3 e 4.

Para o efeito é necessário determinar as características geométricas e mecânicas de cada secção através de uma análise dos polígonos correspondentes à superfície exterior, média e interior, tal como se ilustra na Figura 4.12.

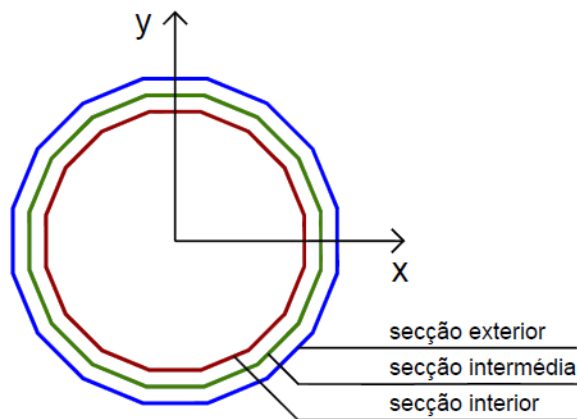


Figura 4.12 - Polígonos a considerar no cálculo

Para tal, utilizou-se o seguinte procedimento:

1. Cálculo do ângulo onde cada vértice do polígono se encontra relativamente ao eixo horizontal:

$$\alpha = \frac{2 \cdot \pi}{n} \quad (4.12)$$

$$\beta_i = x - \alpha \quad (4.13)$$

$$\beta_{i+1} = \beta_i - \alpha \quad (4.14)$$

Em que:

$i$  – Índice de cada vértice, disposto no sentido horário. Num polígono com  $n$  lados analisa-se  $n+1$  vértices;

$\alpha$  – Ângulo de desvio de cada face do polígono;

$x$  – Ângulo do primeiro vértice relativamente à horizontal;

$\beta$  – Ângulo correspondente ao vértice  $i$ .

Os dados relativos ao ponto anterior são ilustrados na Figura 4.13.

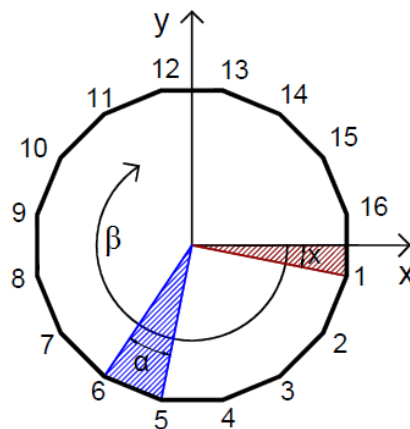


Figura 4.13 - Polígono de 12 lados com  $n+1$  vértices numerados no sentido horário

2. Cálculo das coordenadas cartesianas relativamente ao centro do polígono:

$$x_i = \frac{\emptyset}{2} \cdot \cos(\beta_i) \quad (4.15)$$

$$y_i = \frac{\emptyset}{2} \cdot \sin(\beta_i) \quad (4.16)$$

Onde:

$\emptyset$  – Diâmetro da circunferência que passa pelos vértices do polígono;

$x_i$  – Coordenada horizontal do vértice  $i$ ;

$y_i$  – Coordenada vertical do vértice  $i$ ;

3. Cálculo da largura de cada face do polígono, b:

$$b = \sqrt{((x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2)} \quad (4.17)$$

As expressões nas próximas três etapas baseiam-se no método apresentado por Reznicek [114] que permite o cálculo das características de figuras com contorno fechado.

4. Cálculo da área do polígono cheia (n lados e n+1 pontos):

$$A = \sum_{i=1}^n \Delta A = \sum_{i=1}^n (x_{n+1} - x_n) \cdot (y_{n+1} + y_n) / 2 \quad (4.18)$$

5. Cálculo dos momentos estáticos:

$$S_x = \sum_{i=1}^n \Delta S_x = \sum_{i=1}^n \frac{(x_{n+1} - x_n)}{8} \cdot \left( \frac{(y_{n+1} + y_n)^2 + (y_{n+1} - y_n)^2}{8} \right) \quad (4.19)$$

$$S_y = \sum_{i=1}^n \Delta S_y = \sum_{i=1}^n \frac{(y_{n+1} - y_n)}{8} \cdot \left( \frac{(x_{n+1} + x_n)^2 + (x_{n+1} - x_n)^2}{8} \right) \quad (4.20)$$

6. Cálculo dos momentos de inércia:

$$I_x = \sum_{i=1}^n \Delta I_x = \sum_{i=1}^n \left( \frac{(x_{n+1} - x_n) \cdot (y_{n+1} + y_n)}{24} \right) \cdot ((y_{n+1} + y_n)^2 + (y_{n+1} - y_n)^2) \quad (4.21)$$

$$I_y = \sum_{i=1}^n \Delta I_y = \sum_{i=1}^n \left( \frac{(y_{n+1} - y_n) \cdot (x_{n+1} + x_n)}{24} \right) \cdot ((x_{n+1} + x_n)^2 + (x_{n+1} - x_n)^2) \quad (4.22)$$

Na análise de secções de classe 3 e 4 é necessário estudar a secção real e efetiva respetivamente. Para o efeito recorreu-se à seguinte conduta:

1. Cálculo das características brutas da secção:

$$A = A_{\text{polígono exterior}} - A_{\text{polígono interior}} \quad (4.23)$$

$$S_x = S_x \text{ polígono exterior} - S_x \text{ polígono interior} \quad (4.24)$$

$$S_y = S_y \text{ polígono exterior} - S_y \text{ polígono interior} \quad (4.25)$$

$$I_x = I_x \text{ polígono exterior} - I_x \text{ polígono interior} \quad (4.26)$$

$$I_y = I_y \text{ polígono exterior} - I_y \text{ polígono interior} \quad (4.27)$$

2. Cálculo da resistência ao esforço axial e momento fletor da secção bruta (classe 3):

$$N_{rd,bruto} = A \cdot f_y \quad (4.28)$$

$$M_{rd,bruto} = \left(\frac{I}{x_{máx}}\right) \cdot f_y \quad (4.29)$$

3. Cálculo da tensão máxima admissível em cada vértice da secção média:

$$\text{Na análise ao esforço axial resistente: } \sigma_i = \frac{N_{rd,bruto}}{A} \quad (4.30)$$

$$\text{Na análise ao momento fletor resistente: } \sigma_i = \frac{M_{rd,bruto}}{I} \cdot x_i \quad (4.31)$$

4. Cálculo da necessidade de redução das secções de classe 4 e respetivos retângulos a descontar em cada face do polígono na secção bruta, de acordo com a EN 1993-1-5 [67], Figura 4.14 da presente dissertação;
5. Cálculo das coordenadas cartesianas do retângulo a descontar em cada face de acordo com o seguinte esquema:

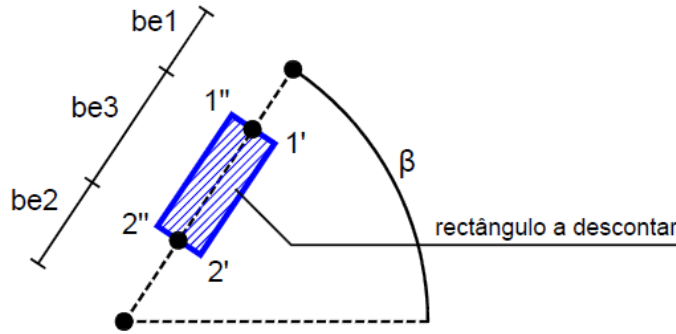


Figura 4.14 - Ilustração genérica de uma face do polígono

$$x'_1 = \left(x_i - (B_{e1} \cdot \text{sen}(\beta))\right) + \left(\frac{\text{espessura}}{2} \cdot \cos(\beta)\right) \quad (4.32)$$

$$x''_1 = \left(x_i - (B_{e1} \cdot \text{sen}(\beta))\right) - \left(\frac{\text{espessura}}{2} \cdot \cos(\beta)\right) \quad (4.33)$$

$$x'_2 = \left(x_i - ((B_{e1} + B_{e3}) \cdot \text{sen}(\beta))\right) + \left(\frac{\text{espessura}}{2} \cdot \cos(\beta)\right) \quad (4.34)$$

$$x''_2 = \left(x_i - ((B_{e1} + B_{e3}) \cdot \text{sen}(\beta))\right) - \left(\frac{\text{espessura}}{2} \cdot \cos(\beta)\right) \quad (4.35)$$

$$y'_1 = \left(y_i - (B_{e1} \cdot \cos(\beta))\right) - \left(\frac{\text{espessura}}{2} \cdot \text{sen}(\beta)\right) \quad (4.36)$$

$$y''_1 = \left(y_i - (B_{e1} \cdot \cos(\beta))\right) + \left(\frac{\text{espessura}}{2} \cdot \text{sen}(\beta)\right) \quad (4.37)$$

$$y'_2 = \left(y_i - ((B_{e1} + B_{e3}) \cdot \cos(\beta))\right) - \left(\frac{\text{espessura}}{2} \cdot \text{sen}(\beta)\right) \quad (4.38)$$

$$y''_2 = \left(y_i - ((B_{e1} + B_{e3}) \cdot \cos(\beta))\right) + \left(\frac{\text{espessura}}{2} \cdot \text{sen}(\beta)\right) \quad (4.39)$$

6. Cálculo do centro de gravidade de cada retângulo em cada face:

$$x_{cg,retângulo} = \left( x_i - \left( (B_{e1} + \frac{B_{e3}}{2}) \cdot \text{sen}(\beta) \right) \right) \quad (4.40)$$

7. Cálculo do momento estático de cada retângulo em torno do eixo Y:

$$S_{y,retângulo} = A_{retângulo} \cdot x_{cg} \quad (4.41)$$

8. Cálculo da área de cada retângulo:

$$A_{retângulo} = b_{e3} \cdot \text{espessura} \quad (4.42)$$

9. Cálculo do novo centro de gravidade da peça:

$$C.G.x = \frac{\sum S_{y,retângulo}}{(A_{bruta\ peça} - \sum A_{retângulo})} \quad (4.43)$$

10. Cálculo da inércia de cada retângulo relativamente ao novo centro de gravidade da peça:

$$I_{y,retângulo,C.G.x} = I_{y,retângulo} + A_{retângulo} \cdot (x_{cg,retângulo} + C.G.x)^2 \quad (4.44)$$

11. Cálculo da inércia efetiva da peça relativamente ao seu novo centro de gravidade:

$$I_{y,eff} = (I_y + A \cdot C.G.x^2) - \sum I_{y,retângulo,C.G.x} \quad (4.45)$$

12. Cálculo da distância máxima dos vértices para a determinação do módulo de flexão:

$$d_{máx} = x_{máx} + C.G.x \quad (4.46)$$

13. Cálculo do módulo de flexão efetivo:

$$W_{eff} = \frac{I_{y,eff}}{d_{máx}} \quad (4.47)$$

14. Cálculo da área efetiva da peça:

$$A_{eff} = A - \sum A_{retângulo} \quad (4.48)$$

15. Cálculo da resistência ao esforço axial e momento fletor da secção efetiva:

$$N_{rd,eff} = A_{eff} \cdot f_y \quad (4.49)$$

$$M_{rd,eff} = W_{eff} \cdot f_y \quad (4.50)$$

#### 4.6.4 RESULTADOS DO PROGRAMA DE CÁLCULO

A validação do método de cálculo automático desenvolvida pelo autor foi realizada manualmente, através da comparação dos resultados obtidos pela simulação de várias secções poligonais no programa informático “Coldform” [115] e pela comparação direta com os ábacos existentes na EN 50341-1 [101].

No Anexo A2 encontram-se ilustrados os módulos de cálculo respetivos.

A utilização desta aplicação permitiu gravar resultados e traçar ábacos conforme o número de lados  $n$  do polígono seccional e conforme a tensão de cedência dos vários aços estudados.

##### 4.6.4.1 Ábacos do rácio da área efetiva com a área elástica em função do rácio do diâmetro exterior com a espessura

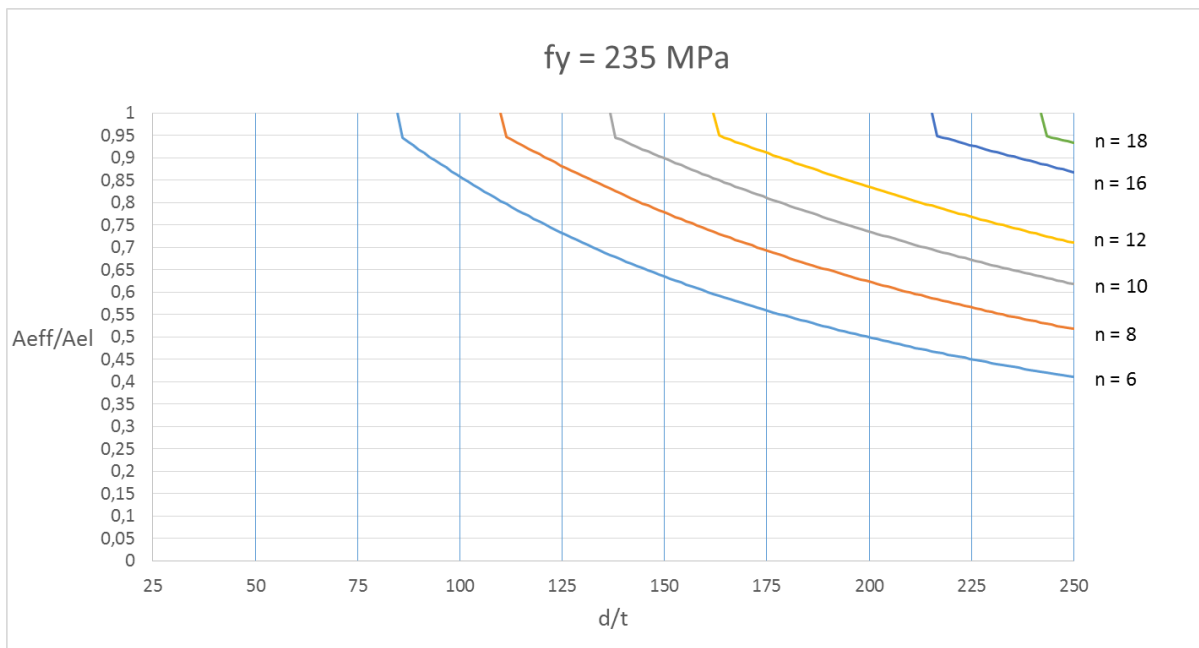


Figura 4.15 - Razão entre a área efetiva e área elástica de secções transversais de classe 4 em aço S 235



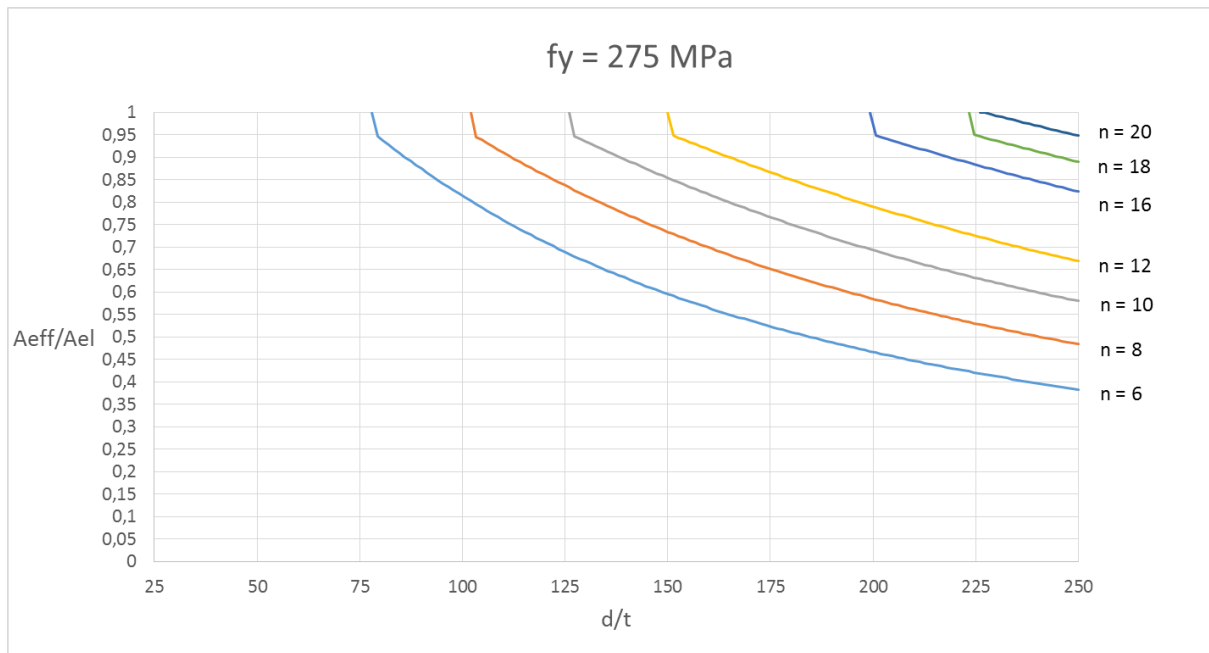


Figura 4.16 - Razão entre a área efetiva e área elástica de seções transversais de classe 4 em aço S 275

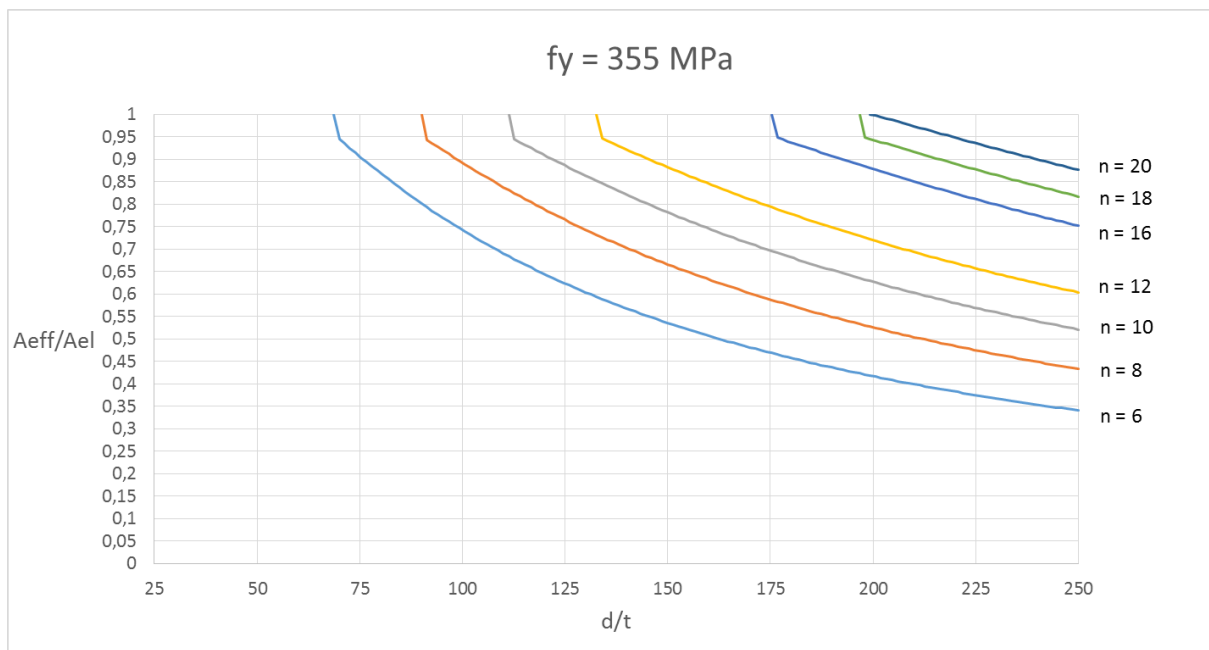


Figura 4.17 - Razão entre a área efetiva e área elástica de seções transversais de classe 4 em aço S 355

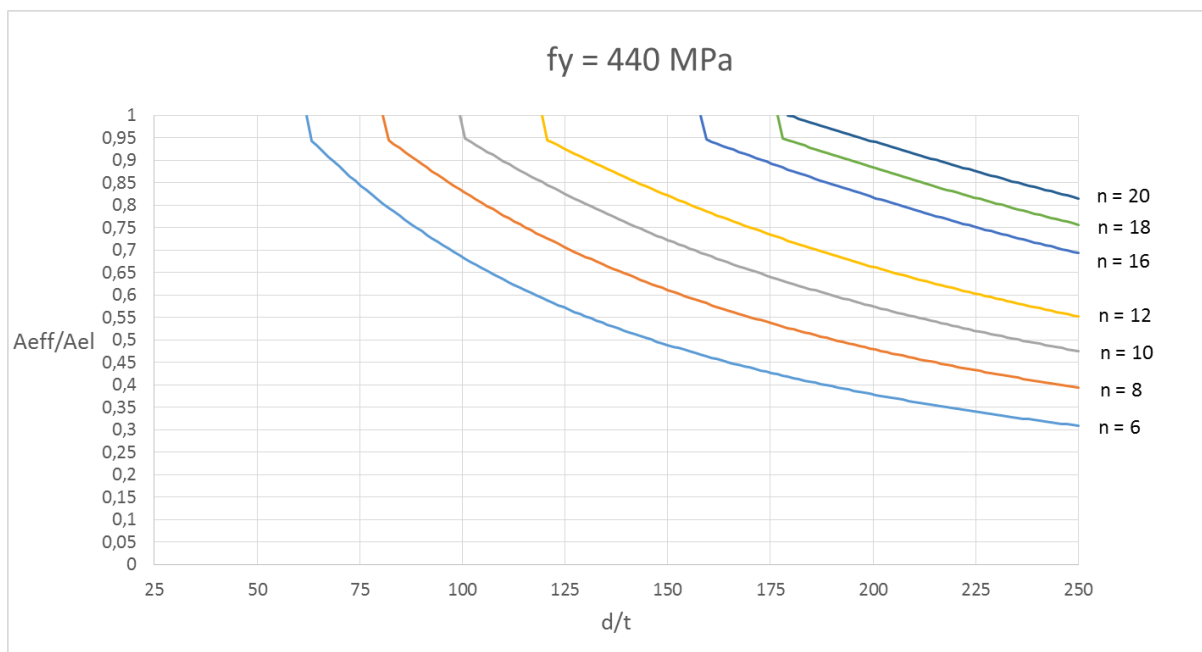


Figura 4.18 - Razão entre a área efetiva e área elástica de secções transversais de classe 4 em aço S 450

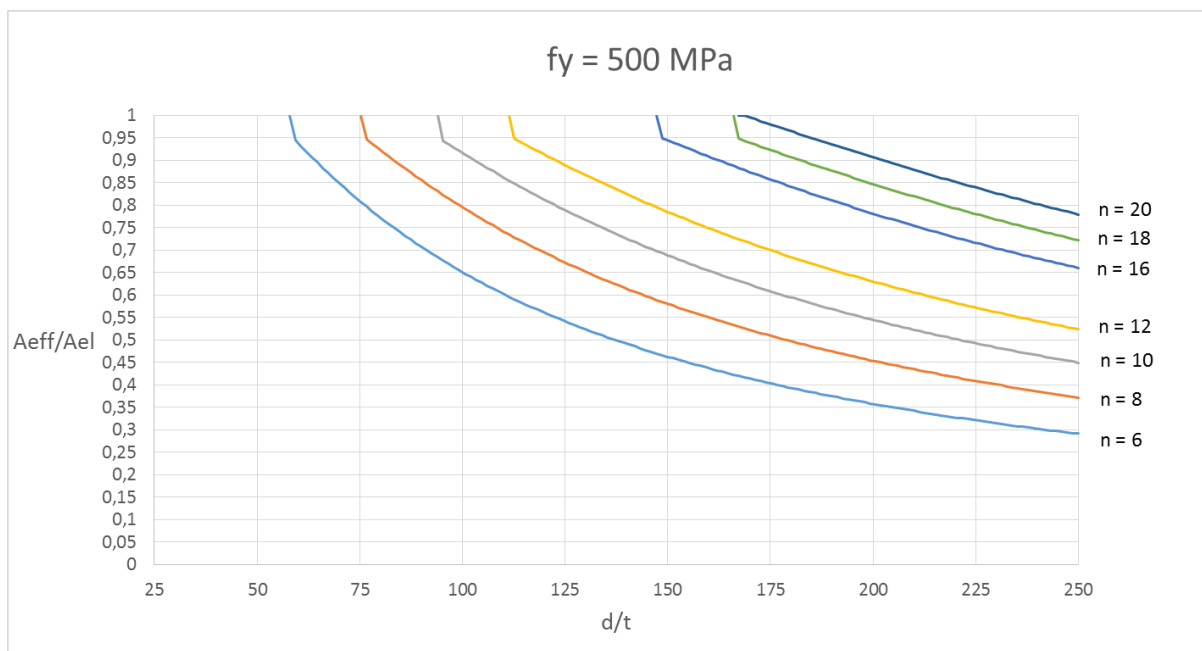


Figura 4.19 - Razão entre a área efetiva e área elástica de secções transversais de classe 4 em aço S 500

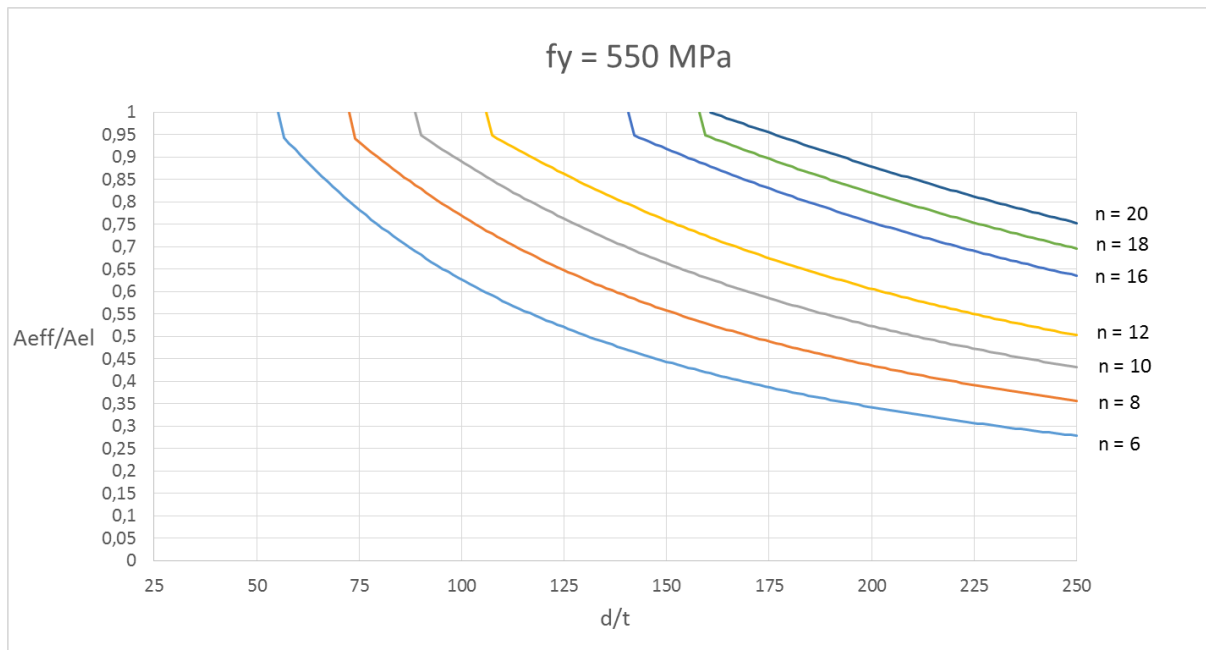


Figura 4.20 - Razão entre a área efetiva e área elástica de secções transversais de classe 4 em aço S 550

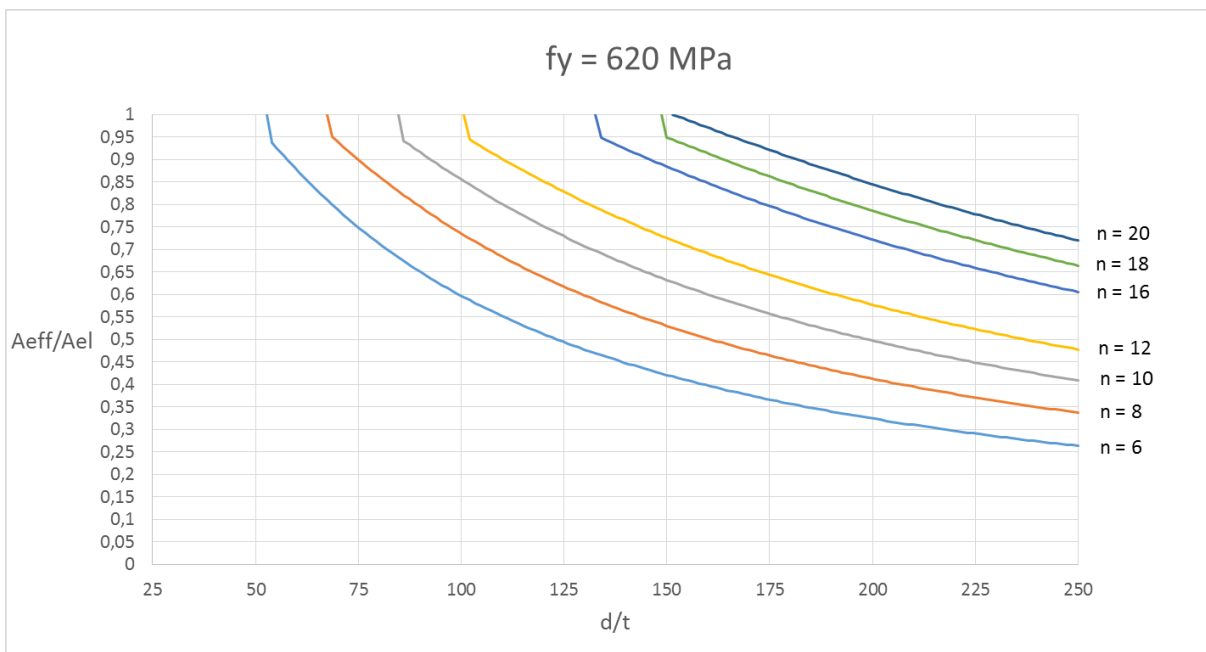


Figura 4.21 - Razão entre a área efetiva e área elástica de secções transversais de classe 4 em aço S 620

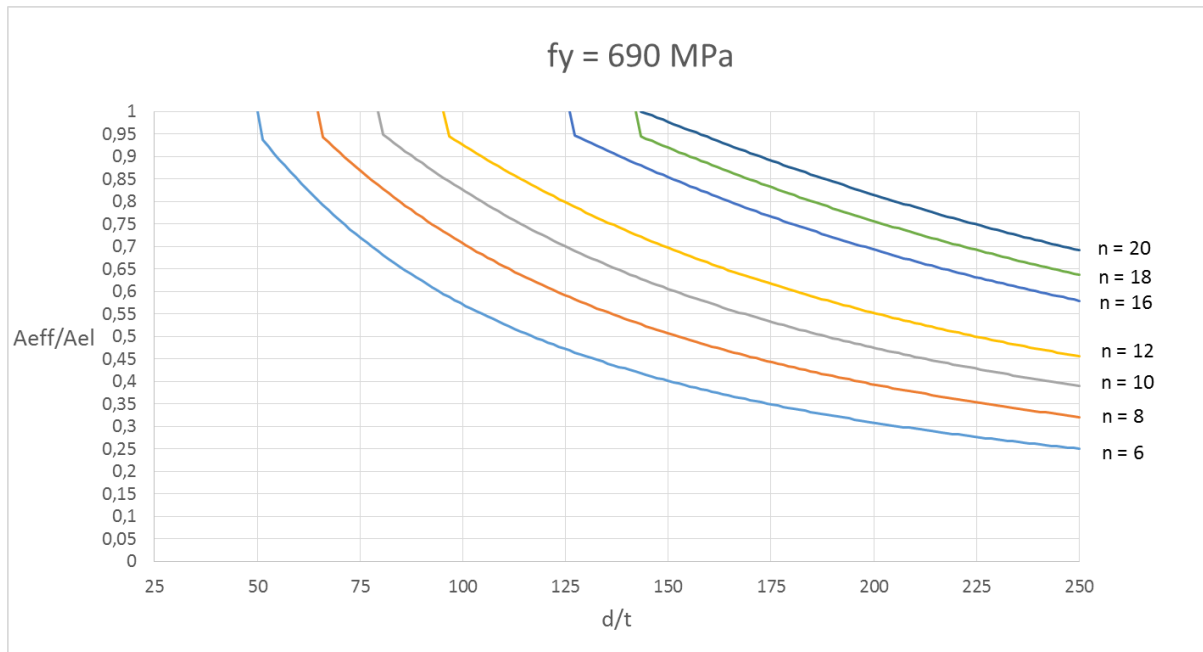


Figura 4.22 - Razão entre a área efetiva e área elástica de secções transversais de classe 4 em aço S 690

4.6.4.2 Âbacos do rácio do módulo de flexão efetivo com o módulo de flexão elástico em função do rácio do diâmetro exterior com a espessura

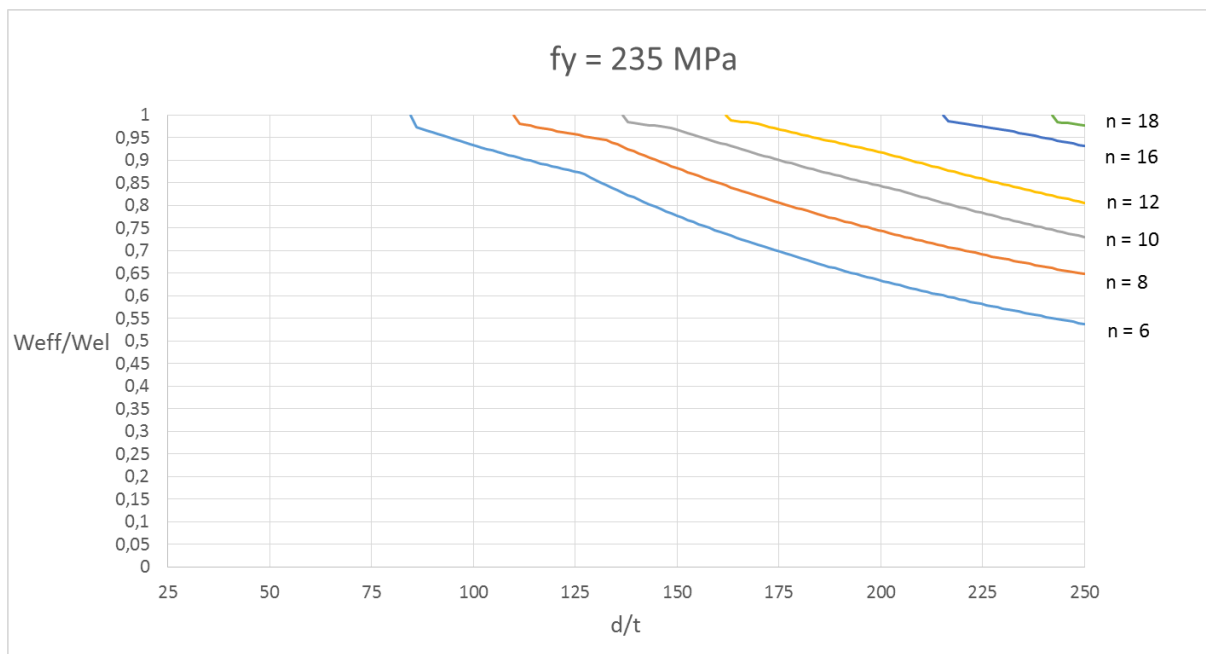


Figura 4.23 - Razão entre o módulo de flexão efetivo e módulo de flexão elástico de secções transversais de classe 4 em aço S 235

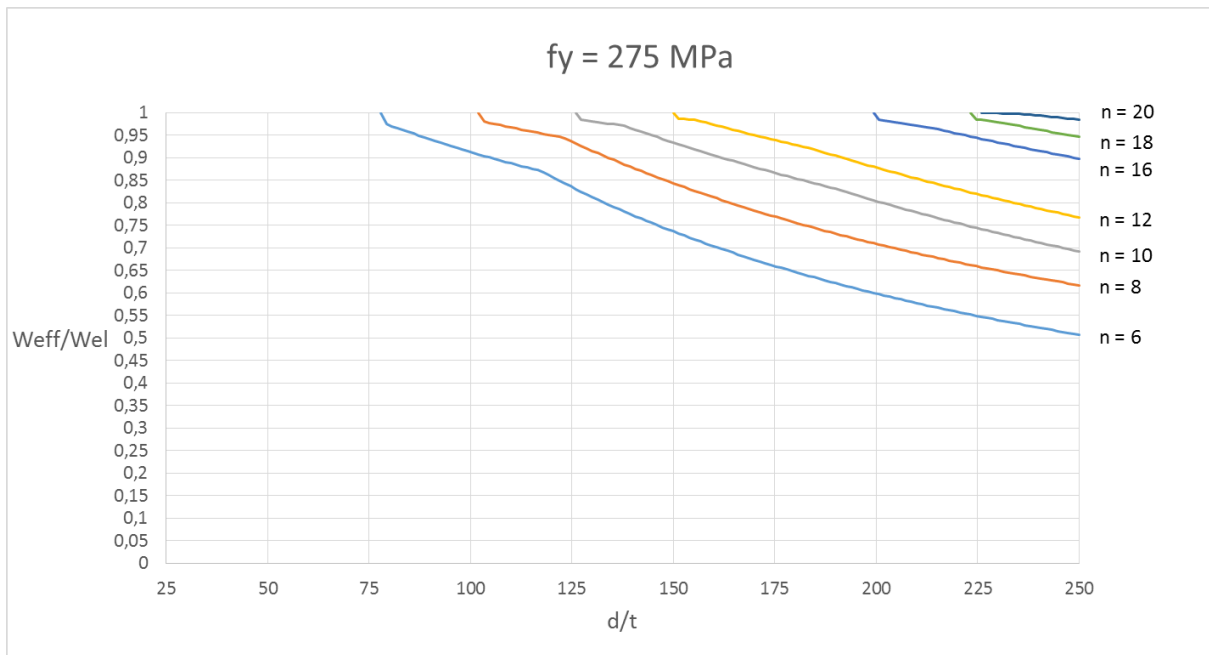


Figura 4.24 - Razão entre o módulo de flexão efetivo e módulo de flexão elástico de secções transversais de classe 4 em aço S 275

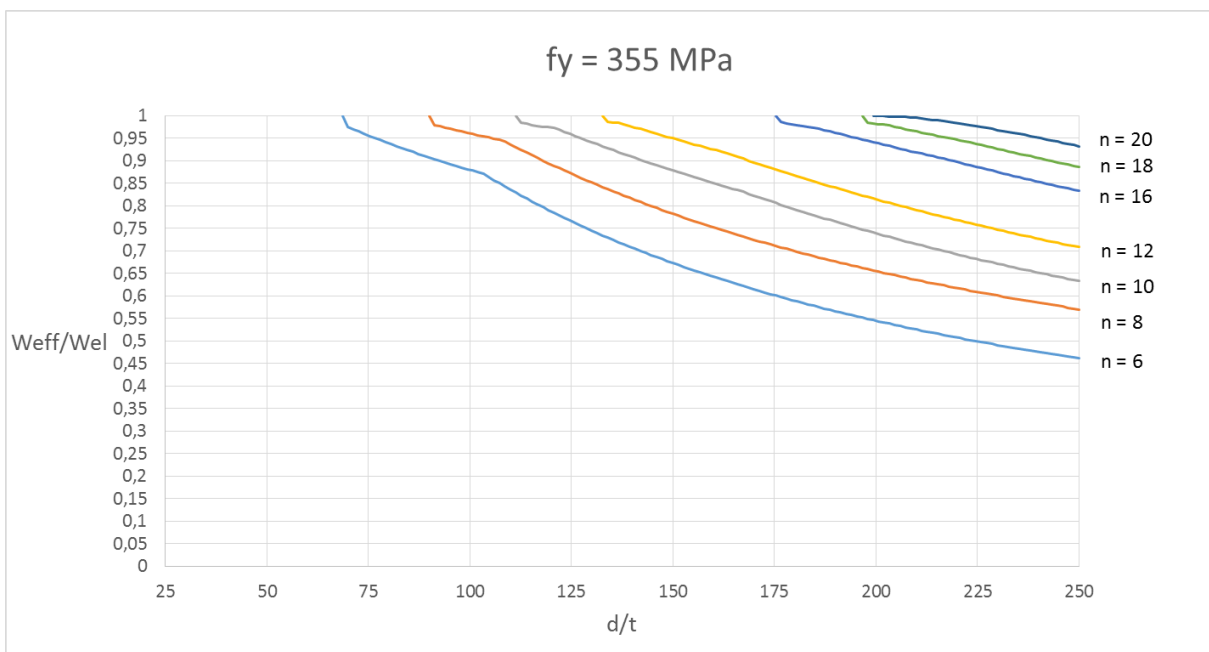


Figura 4.25 - Razão entre o módulo de flexão efetivo e módulo de flexão elástico de secções transversais de classe 4 em aço S 355

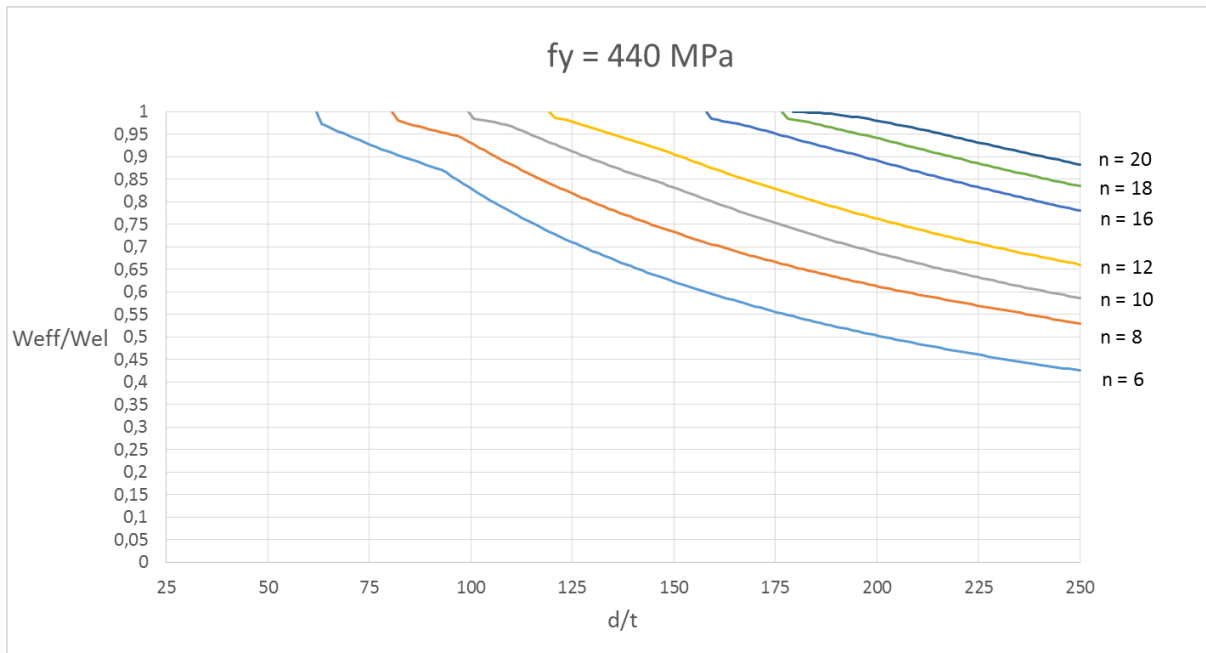


Figura 4.26 - Razão entre o módulo de flexão efetivo e módulo de flexão elástico de secções transversais de classe 4 em aço S 450

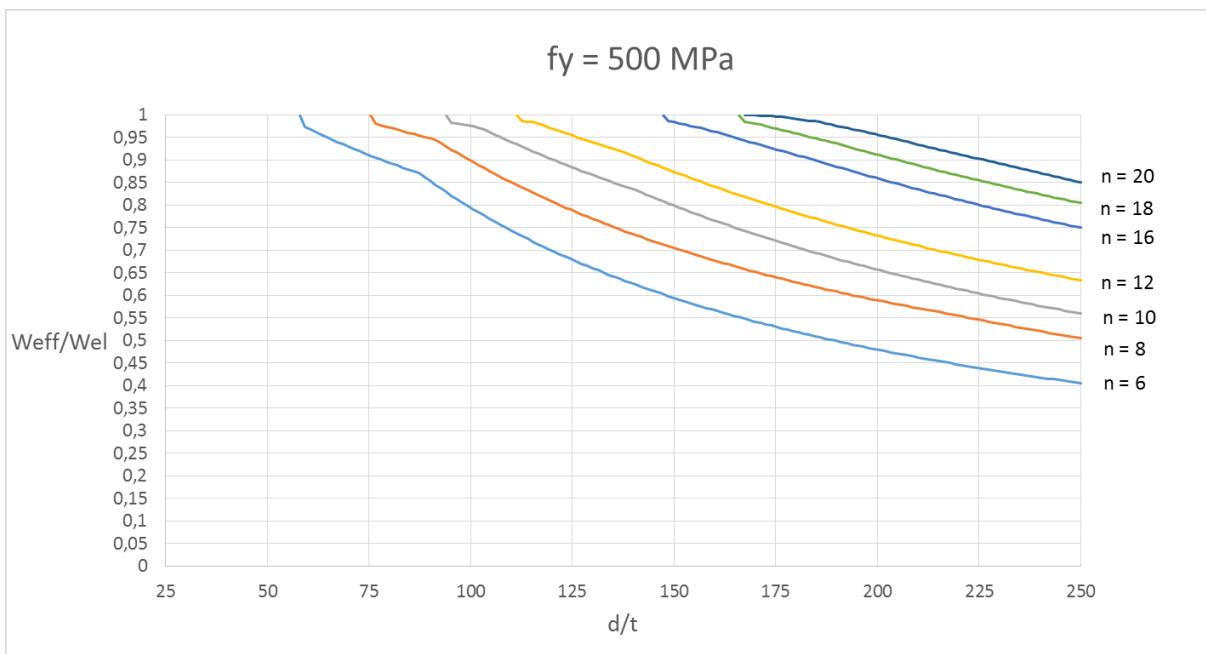


Figura 4.27 - Razão entre o módulo de flexão efetivo e módulo de flexão elástico de secções transversais de classe 4 em aço S 500

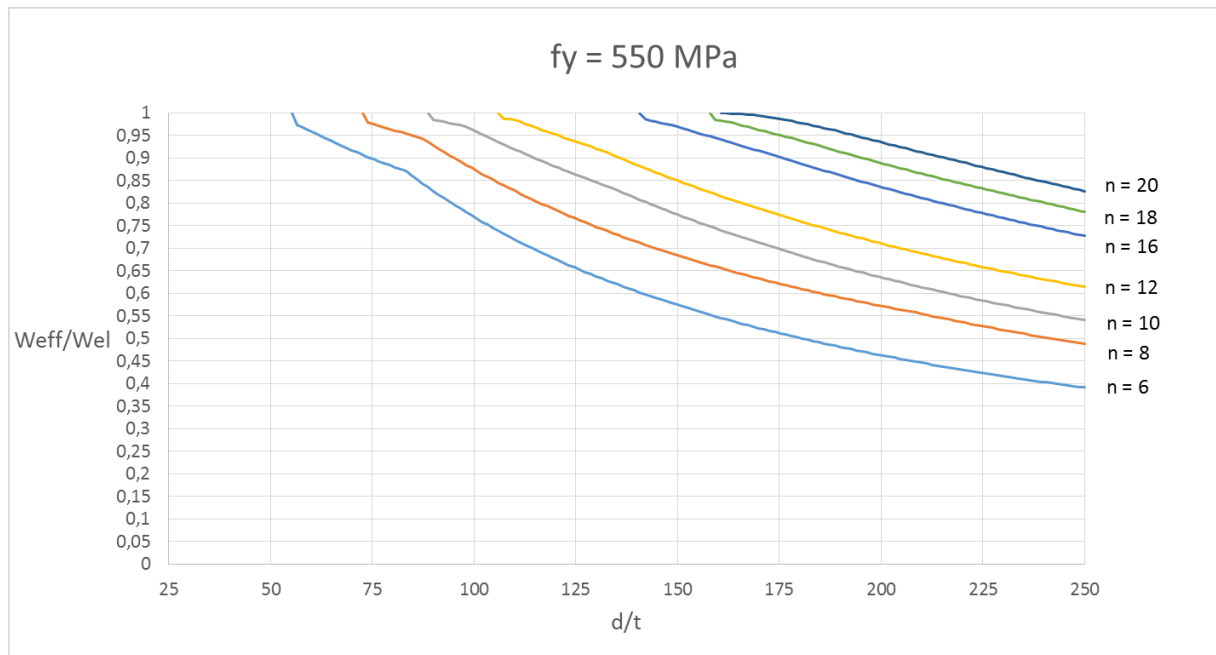


Figura 4.28 - Razão entre o módulo de flexão efetivo e módulo de flexão elástico de seções transversais de classe 4 em aço S 550

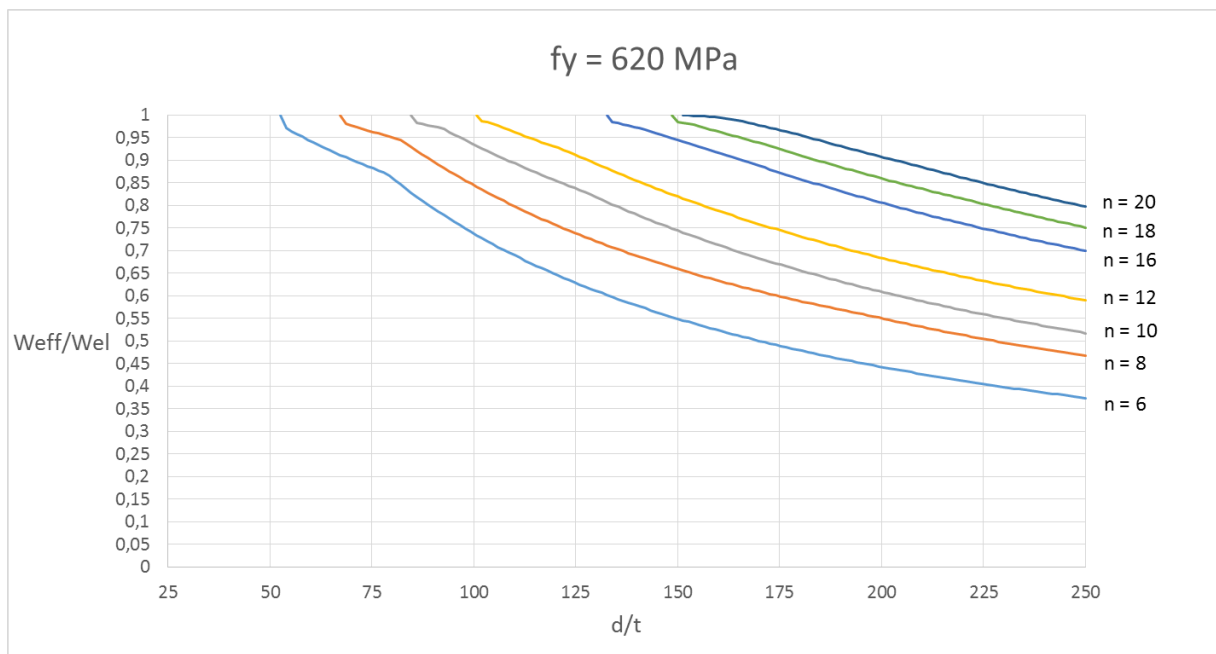


Figura 4.29 - Razão entre o módulo de flexão efetivo e módulo de flexão elástico de seções transversais de classe 4 em aço S 620

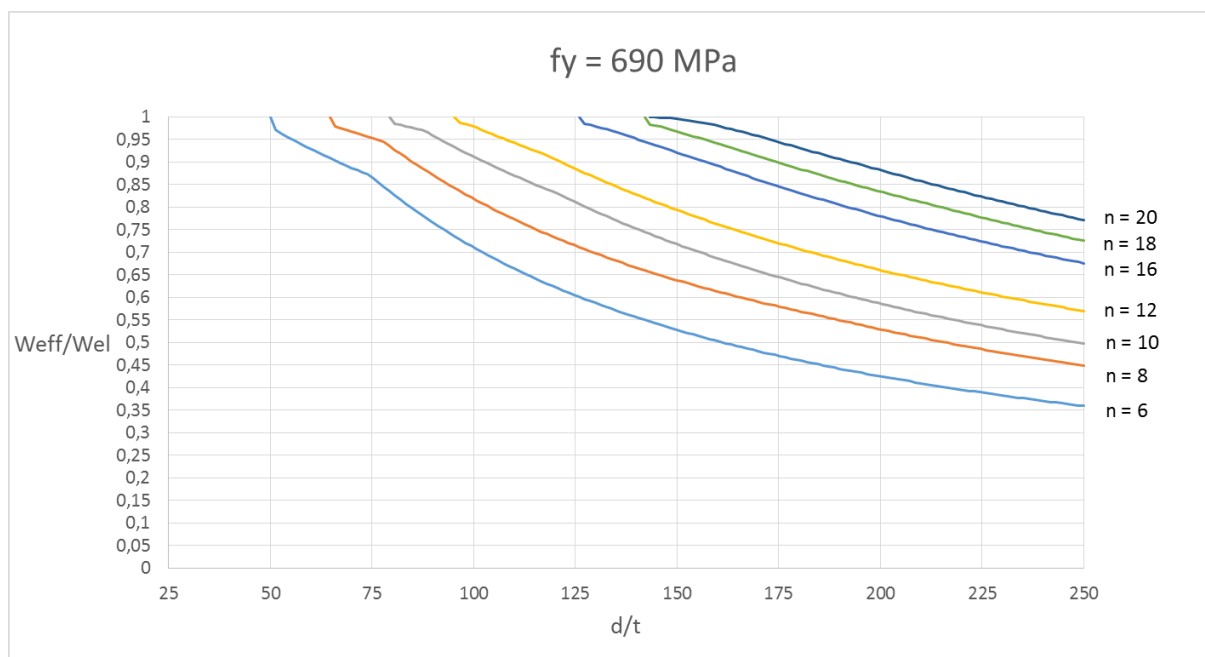


Figura 4.30 - Razão entre o módulo de flexão efetivo e módulo de flexão elástico de secções transversais de classe 4 em aço S 690

#### 4.6.5 VERIFICAÇÃO DE SEGURANÇA À ENCURVADURA

O método mais comum e tradicional para o dimensionamento e verificação de segurança a este fenómeno baseia-se nas curvas de encurvadura apresentadas no subcapítulo 6.3 da EN 1993-1-1 [30].

Para esta avaliação recorre-se, no presente trabalho, ao novo procedimento designado como “Método geral de verificação da encurvadura por flexão e da encurvadura lateral de componentes estruturais”. Este é apresentado no ponto 6.3.4 da EN 1993-1-1 [30] e expõe-se no subcapítulo seguinte.

### 4.7 MÉTODO GERAL DE VERIFICAÇÃO DA ENCURVADURA POR FLEXÃO E ENCURVADURA LATERAL

#### 4.7.1 INTRODUÇÃO

Antes de existirem os computadores digitais e os métodos de cálculo numéricos, as regras e normas de projeto presentes nos códigos e regulamentos apenas se podiam basear em fórmulas e procedimentos simples, fáceis de usar, sempre dentro das limitações do cálculo pessoal e manual. Geralmente o processo de verificação estrutural era composto por duas fases distintas e cuja interação era raramente considerada [116]:

- Análise – cálculo da resposta da estrutura (deformações, forças, tensões, etc.) para um determinado carregamento;
- Resistência – cálculo dos limites estruturais (secções transversais, resistências de ligações, etc.) para uma determinada resposta.

A primeira etapa era pouco regulamentada e envolvia ferramentas de cálculo simples cujos resultados eram inequívocos. Os efeitos estruturais mais complicados, como os efeitos de segunda ordem ou torção, eram simplificados por valores aproximados ou simplesmente ignorados.



A segunda fase, bem mais controlada pelas Normas, regia-se por princípios simples que permitiam o cálculo manual e tinha em atenção as incertezas associadas a estes modelos simplificados.

Como consequência destas várias simplificações, o projeto estrutural era apenas desenvolvido ao nível das secções transversais e elementos estruturais individuais. Deste modo, os múltiplos modos de falha e colapso globais de uma estrutura (impossíveis de se averiguar apenas a nível individual dos seus vários componentes estruturais) não eram passíveis de análise e verificação.

No decorrer dos anos estes métodos de análise desenvolveram-se profundamente mas nunca abandonaram o conceito de individualização e divisão de uma estrutura completa pelos vários elementos constituintes e continuaram com as duas fases distintas, já referidas, que compõem o processo de verificação estrutural.

Na era moderna, com a revolução digital e com o aparecimento dos computadores, surgiram programas informáticos de análise estrutural que abriram novas possibilidades aos projetistas, não só devido à rápida capacidade de cálculo mas também pelos novos métodos numéricos, e que permitiram desenvolver a eficiência e produtividade. Contudo, estes novos meios apenas influenciaram qualitativamente a fase da análise estrutural através do cálculo automático e célere dos vários fenómenos estruturais. A fase de dimensionamento e projeto manteve-se igual já que o cálculo de resistências não se desenvolveu com as novas possibilidades computacionais.

Visto isto, os programas informáticos cresceram e conceberam novas ferramentas para a análise estrutural mas ficaram sempre limitados pelos regulamentos estruturais que indicavam regras orientadas para o cálculo manual e individual das resistências.

Com este problema, a equipa de pesquisa e desenvolvimento dos Eurocódigos estruturais concebeu uma primeira solução: a última versão da EN 1993-1-1 [30] inclui um novo método geral que permite a análise de resistências e estabilidade estrutural com total recurso às potencialidades dos programas informáticos de análise estrutural, nomeadamente através de modelos geométricos globais 3D e elementos finitos gerais.

No entanto, este novo método continua pouco conhecido e aproveitado pelos projetistas devido sobretudo a duas razões:

- A filosofia de um projeto estrutural global é muito diferente dos métodos de projeto convencionais e tradicionais;
- As novas regras envolvem maiores exigências ao nível da modelação e análise estrutural sendo que estas ainda não são suportadas amplamente pelos programas informáticos mais utilizados.

#### 4.7.2 COMPARAÇÃO COM O MÉTODO TRADICIONAL

De acordo com a última versão da EN 1993-1-1 [30], a verificação de estabilidade de uma estrutura metálica, sujeita a esforços axiais e de flexão, pode ser efetuada por três procedimentos distintos [117]:

- Através de uma abordagem baseada em imperfeições, explicada nos subcapítulos 5.2 e 5.3 da Norma [30];
- Através de uma abordagem baseada na análise individual de cada elemento, apresentada nos pontos 6.3.1, 6.3.2 e 6.3.3 da Norma [30];
- Através do novo “Método Geral” descrita na secção 6.3.4 da Norma [30].

No primeiro, a estabilidade de cada elemento estrutural envolve a incorporação de imperfeições geométricas no modelo estrutural pelo que necessita apenas de uma verificação das secções transversais após

uma análise não-linear de segunda ordem (parágrafo 7 do ponto 5.2.2 da EN 1993-1-1 [30]). Este processo raramente é empregue devido às várias incertezas associadas às imperfeições equivalentes, como por exemplo, as formas, amplitudes e tensões residuais.

O segundo procedimento é o mais tradicional e utilizado aquando problemas de encurvadura (apesar da sua limitação a elementos uniformes com condições de apoio e carregamentos simples) e baseia-se em duas simplificações fundamentais:

- O elemento estrutural em análise é separado da estrutura-mãe onde lhe é aplicado condições de fronteira adequadas e equivalentes (apoios, restrições e cargas) aos seus pontos de ligação durante as verificações à encurvadura;
- A análise do elemento é realizada de forma separada para os modos puros de encurvadura (por flexão em elementos uniformes comprimidos e encurvadura lateral em elementos uniformes sob flexão) onde a interligação entre ambos é efetuada através de fatores de interação.

Enquanto a EN 1993-1-1 [30] fornece parâmetros para estes fatores de interação nos Anexos A e B, a definição do comprimento de encurvadura de cada elemento estrutural em problemas mais complexos é inadequado na medida em que este é deliberado integralmente apenas pelo projetista.

Para esta conduta, as etapas básicas para a verificação à encurvadura sob flexão composta são as seguintes:

- 1) Aquisição dos esforços de cálculo internos ( $N_{Ed}$  e  $M_{y,Ed}$ ) no elemento examinado de acordo com o tipo de análise correta (primeira ou segunda ordem);
- 2) Cálculo das forças elásticas críticas ( $N_{cr}$  e  $M_{y,cr}$ ) do elemento de acordo o modo de encurvadura apropriado – secções 6.3.1.2 e 6.3.2.2 da Norma [30];
- 3) Cálculo das resistências últimas ( $N_{c,Rk}$  e  $M_{y,Rk}$ ) da secção transversal mais crítica do elemento - equações 6.10 – 6.11 e 6.13 – 6.15 da Norma [30];
- 4) Obtenção da esbelteza do elemento ( $\lambda$ ) e correspondentes fatores de redução ( $\chi$ ) para cada modo puro de encurvadura:

$$\lambda = \sqrt{\frac{N_{c,Rk}}{N_{cr}}} \rightarrow \chi(\lambda) \text{ (equação 6.49 da EN 1993-1-1 [30])} \quad (4.51)$$

$$\lambda_{LT} = \sqrt{\frac{M_{y,Rk}}{M_{y,cr}}} \rightarrow \chi_{LT}(\lambda_{LT}) \text{ (equação 6.56 da EN 1993-1-1)} \quad (4.52)$$

- 5) Aquisição dos fatores de interação entre os dois modos de encurvadura nos Anexos A ou B:

$$K_{zy}$$

- 6) Verificação da estabilidade do elemento à encurvadura através das expressões 6.61 e 6.62 da Norma:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} + K_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1,0 \text{ (equação 6.62 da EN 1993-1-1)} \quad (4.53)$$

A primeira etapa é simples e geralmente é efetuada através modelos realizados em programas informáticos de análise estrutural [116]. O terceiro passo é executado facilmente através das fórmulas dadas pelo Eurocódigo 3 [30] e as restantes fases são cálculos diretos e fáceis de se realizar. A segunda etapa (cálculo das forças elásticas críticas) é aquela que mais influência tem em todo o processo. O EC3 [30]

não regulamenta a sua concretização mas apresenta alguns requisitos gerais. Normalmente, o seu cálculo é praticado através de algumas expressões analíticas compostas por diversos parâmetros relacionados com as condições de apoio e carregamento (comprimentos efetivos, fator de gradiente dos momentos, etc.). Apesar de existir uma grande variedade de artigos e livros que ajudam na determinação destes parâmetros para distintos tipos de problemas, de um modo geral, a escolha dos mesmos recai na experiência e conhecimento do projetista o que origina grandes incertezas durante o projeto com a consequência de uma estrutura final pouco económica e/ou pouco segura.

É neste ponto que o recente método geral apresenta uma grande mudança na medida em que utiliza as potencialidades do cálculo computacional para a obtenção dos esforços críticos. O conceito básico por trás deste método é que a análise não é realizada individualmente em cada membro estrutural e para cada modo puro de encurvadura mas considerando sim a estrutura completa associada a uma complexa distribuição de esforços e composição de modos de encurvadura [117]. Isto permite obter soluções em situações onde o isolamento de elementos estruturais não proporciona uma abordagem totalmente eficaz, apropriada e correta:

- O método geral é aplicável não só a membros unitários e isolados mas também a modelos estruturais completos onde os modos de encurvadura são influenciados pela estrutura como um todo;
- Possibilita o estudo de elementos irregulares como por exemplo componentes cónicos;
- Permite a existência de cargas e apoios irregulares onde a separação em modos puros de encurvadura não é possível.

Apesar de ser indicado apenas para a verificação da encurvadura por flexão e lateral de elementos estruturais, a sua aplicação básica pode ser estendida a outros casos.

Este método introduz os fatores amplificadores a aplicar aos esforços internos para se atingir as resistências características das secções transversais ( $\alpha_{ult,k}$ ) e de forma a permitir atingir as resistências à encurvadura do membro em questão ( $\alpha_{cr}$ ) [116]:

$$\alpha_{ult,k,N} = \frac{N_{c,Rk}}{N_{Ed}}; \quad \alpha_{cr,N} = \frac{N_{cr}}{N_{Ed}} \quad (4.54)$$

$$\alpha_{ult,k,M} = \frac{M_{y,Rk}}{M_{y,Ed}}; \quad \alpha_{cr,M} = \frac{M_{y,cr}}{M_{y,Ed}} \quad (4.55)$$

Estes fatores levam a uma nova forma de cálculo de esbeltezas e consequentes verificações de segurança:

$$\lambda = \sqrt{\frac{\alpha_{ult,k,N}}{\alpha_{cr,N}}}; \quad 1 \leq \frac{\chi \cdot \alpha_{ult,k,N}}{\gamma_{M1}} \quad (4.56)$$

$$\lambda_{LT} = \sqrt{\frac{\alpha_{ult,k,M}}{\alpha_{cr,M}}}; \quad 1 \leq \frac{\chi_{LT} \cdot \alpha_{ult,k,M}}{\gamma_{M1}} \quad (4.57)$$

Deste modo, o método geral de verificação da encurvadura por flexão e da encurvadura lateral de componentes estruturais pode ser dividido pelas seguintes etapas:

- 1) Aquisição dos esforços de cálculo internos ( $N_{Ed}$  e  $M_{y,Ed}$ ) no elemento examinado de acordo com o tipo de análise correta (primeira ou segunda ordem);
- 2) Cálculo do valor mínimo do fator de amplificação a aplicar às ações de cálculo para se atingir o carregamento crítico elástico ( $\alpha_{cr}$ ) através da seguinte expressão:

$$\alpha_{cr} = \min(\alpha_{cr,N}; \alpha_{cr,M}) \quad (4.58)$$

- 3) Cálculo do valor mínimo do fator de amplificação a aplicar às ações de cálculo para se atingir o valor característico da resistência da secção transversal mais crítica do componente estrutural:

$$\alpha_{ult,k} = \min(\alpha_{ult,k,N}; \alpha_{ult,k,M}) \quad (4.59)$$

- 4) Obtenção da esbelteza geral e fatores de redução:

$$\lambda_{op} = \sqrt{\frac{\alpha_{ult,k}}{\alpha_{cr}}} \rightarrow \chi(\lambda_{op}), \chi_{LT}(\lambda_{op}) \text{ (equação 6.64 da EN 1993-1-1 [30])} \quad (4.60)$$

- 5) Verificar a estabilidade global com recurso à equação:

$$\frac{\chi_{op} \cdot \alpha_{ult,k}}{\gamma_{M1}} \geq 1,0 \quad (4.61)$$

Onde  $\chi_{op}$  é igual ao mínimo entre de  $\chi$  e  $\chi_{LT}$ .

O significado dos fatores de amplificação é ilustrado na Figura 4.31:

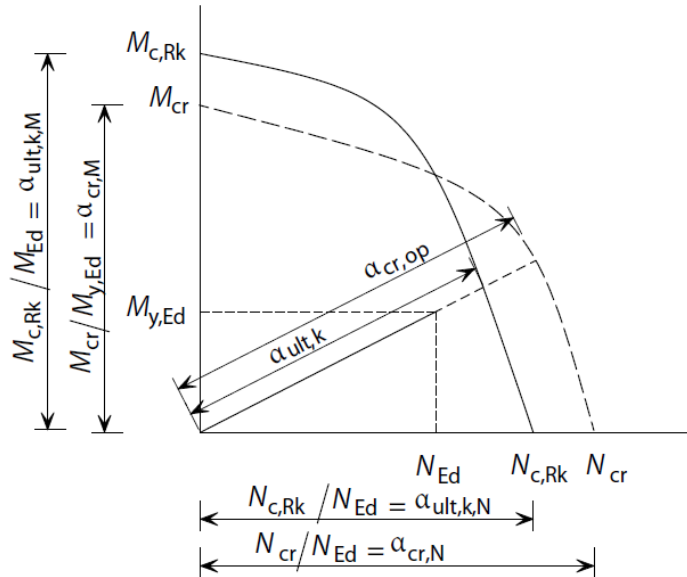


Figura 4.31 - Fatores de amplificação para o método convencional e método geral [117]

O cálculo correto destes fatores (que englobam qualquer tipo de encurvadura global) requerem, no entanto, meios de análise mais refinados e/ou programas informáticos específicos. Isto permite que a análise seja simples mesmo em casos onde o carregamento e o comportamento à encurvadura sejam complexos.

#### 4.7.3 EXEMPLOS DE INADEQUABILIDADES NA APLICAÇÃO DO MÉTODO CONVENCIONAL

Este subcapítulo introduz três exemplos de tópicos importantes que se tornam em problemas quando se aplica o método convencional mas onde a abordagem pelo método geral oferece solução.

#### 4.7.3.1 Parâmetros de encurvadura

Com a aplicação do método convencional é necessário recorrer a curvas de encurvadura e fatores de interação durante a análise. Estes parâmetros foram calibrados para elementos simples, uniformes e simplesmente apoiados. Contudo, este tipo de situação raramente ocorre em estruturas reais de complexidade mais elevada [116]. É neste caso onde os parâmetros do método convencional entram por forma a reduzir a estrutura real à estrutura modelo para que se possa prosseguir com os cálculos. Para os modos de encurvadura básicos estes são os seguintes:

- $v_y, v_z$  – fatores de comprimento efetivo para a encurvadura no plano e à flexão que consideram as restrições de rotação no plano de encurvadura nas extremidades do elemento;
- $v_z, v_w$  – fatores de comprimento efetivo para a encurvadura lateral que consideram as restrições de rotação no plano lateral e as restrições à torção nas extremidades do elemento;
- $C_1, C_2, C_3$  – fatores de gradiente dos momentos para a encurvadura lateral que consideram a distribuição dos momentos fletores ao longo do elemento.

A determinação destes parâmetros está associada a vários problemas e dúvidas. Segundo Papp [116], os mais importantes são:

- Em situações onde os elementos são apoiados a meio ou consolas, as soluções para estes valores são raras e incompletas;
- Não existe nenhuma proposta prática para a determinação do fator de comprimento efetivo para a encurvadura lateral ( $v_w$ ) apesar da sua grande influência e dominância na análise;
- Apenas foi recentemente verificado que os fatores de gradiente dos momentos ( $C_1, C_2, C_3$ ) podem depender bastante dos fatores de comprimento efetivo para a encurvadura lateral;
- O cálculo destes fatores pode ser bastante difícil e incerto em situações onde a encurvadura de um determinado elemento constitui apenas uma fração de um modo de encurvadura global envolvendo a estrutura total.

O último ponto é de grande importância na medida em que qualquer estrutura funciona como um mecanismo completo onde, geralmente, existem alguns modos de encurvadura globais que não são passíveis de análise quando se procede ao isolamento dos membros estruturais de acordo com o método convencional. É neste caso que o método geral constitui uma modernização já que permite melhorias a nível de fiabilidade e eficiência durante o projeto e dimensionamento.

#### 4.7.3.2 Irregularidades

As verificações de segurança à encurvadura geralmente englobam fases experimentais e analíticas em modelos simples, elaborados especialmente para a análise de alguns modos de encurvadura – casos regulares. Qualquer tipo de desvio deste cenário origina casos irregulares onde os modelos podem ser divididos em duas categorias [116]:

- Irregularidades estruturais – desvios do modelo geral e uniforme: por exemplo, membros de secção variável ou com encaixes;
- Irregularidades de comportamento – desvio dos modos de encurvadura regulares: por exemplo, encurvadura sob um eixo excêntrico de um elemento devido a apoios laterais excêntricos.

Este género de situações é bastante vulgar em estruturas metálicas e originava problemas que o método convencional não era capaz de resolver, no que resultou em mais um impulso para a elaboração do método geral.

#### 4.7.3.3 Variações de esbelteza

Quando se utiliza o método tradicional na análise das forças elásticas críticas e esbeltezas para cada elemento estrutural em separado, o resultado usual mostra que os valores da esbelteza de cada membro variam consideravelmente dentro de um modelo estrutural coerente [116]. Isto gera um problema de fiabilidade porque o cálculo das forças críticas máximas, e respetivas esbeltezas, é realizado assumindo que os restantes elementos estruturais se encontram em equilíbrio e estáveis. Tal facto não é verdade, já que na realidade, as suas cargas críticas pertencem a um nível de carregamento inferior ao que se era de esperar caso os elementos estivessem isolados. O conceito de rigidez global de uma estrutura reflete muito bem este problema.

É devido à existência destes casos que a EN 1991-1-7 [118] sugere, na secção 3.3, o seguinte:

- “Dimensionar uma estrutura de modo a que caso haja uma falha local (por exemplo o colapso de um único elemento) a sua estabilidade geral, ou de uma parte importante, não seja colocada em risco.”

Ao empregar-se o método geral, estes dilemas são automaticamente identificados pelo que apenas se obtém um fator de amplificação de carregamento crítico que engloba todos os elementos da estrutura total em simultâneo. A robustez da estrutura do modelo não é dividida e adulterada e mantém-se fiel ao caso real.

### 4.8 VERIFICAÇÃO DE SEGURANÇA AO ESFORÇO TRANSVERSO

Para o projeto é ainda fundamental satisfazer a verificação de segurança ao esforço transversal.

Segundo Simões [119] o Eurocódigo 3 parte 1-1 [30] recomenda, sempre que possível, uma avaliação da resistência ao esforço transversal com base numa distribuição plástica de tensões tangenciais.

Em secções transversais submetidas a esforço transversal  $V_{ed}$  e a um momento torsor  $T_{ed}$  (oriundo por exemplo pelo rebentamento de um cabo de transmissão), a EN 1993-1-1 [30] estabelece o seguinte critério na cláusula 6.2.7:

$$\frac{V_{ed}}{V_{pl,T,Rd}} \leq 1,0 \quad (4.62)$$

Sendo  $V_{pl,T,Rd}$  o esforço transversal plástico resistente, reduzido devido ao momento torsor, dado por:

$$V_{pl,T,Rd} = \left[ 1 - \frac{\tau_{T,ed}}{\left(\frac{f_y}{\sqrt{3}}\right)/\gamma_{M0}} \right] \cdot V_{pl,Rd} \quad (\text{para secções fechadas ocas}) \quad (4.63)$$

Em que:

$\tau_{T,ed}$  – Tensão tangencial atuante devido ao momento torsor;

$\gamma_{M0}$  – Coeficiente de segurança igual à unidade (EN 1993-1-1, subcapítulo 6.1);

$V_{pl,Rd}$  – Esforço transversal plástico resistente obtido pela expressão (4.64):

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v \cdot \left(\frac{f_y}{\sqrt{3}}\right)}{\gamma_{M0}} \quad (4.64)$$

Onde:

$A_v$  – Área de corte útil da secção.

A tensão tangencial  $\tau_{T,ed}$  devido à existência de um momento torsor é calculada através da seguinte expressão [120]:

$$\tau_{T,ed} = \frac{T_{ed}}{W_T} \quad (4.65)$$

Com:

$T_{ed}$  – Esforço de cálculo do momento torsor;

$W_T$  – Módulo de torção da secção transversal, calculada para secções fechadas ocas através de [120]:

$$W_t = 2 \cdot \Omega \cdot e \quad (4.66)$$

Sendo:

$\Omega$  – Área inscrita pela linha média das paredes da secção transversal;

$e$  – Espessura da secção transversal.

A resistência de secções submetidas em simultâneo a momento fletor, esforço transversal e momento torsor, deve ser analisada de acordo com o ponto 6.2.8 do Eurocódigo 3 parte 1-1 [30]. Esta cláusula define os seguintes critérios de interação:

- Quando  $V_{ed} < 50\%$  do valor de cálculo da resistência plástica ao esforço transversal  $V_{pl,T,Rd}$ , não é necessário reduzir o valor de cálculo do momento fletor resistente;
- Quando  $V_{ed} \geq 50\%$  do valor de cálculo da resistência plástica ao esforço transversal  $V_{pl,T,Rd}$ , o valor do momento fletor resistente deve ser avaliado com uma tensão de cedência reduzida dada por  $(1-\rho) \cdot f_y$  ao longo da área de corte da secção, sendo  $\rho$  obtido por:

$$\rho = \left( \frac{2 \cdot V_{ed}}{V_{pl,T,Rd}} - 1 \right)^2 \quad (4.67)$$

A Norma em questão define ainda que no caso de almas sem reforços intermédios, a verificação da resistência à encurvadura por esforço transversal deverá ser efetuada de acordo com a EN 1993-1-5 [67] se:

$$\frac{h_w}{t_w} > 72 \cdot \frac{\varepsilon}{\eta} \quad (4.68)$$

Em que:

$h_w$  – Altura da alma;

$t_w$  – Espessura da alma;

$\varepsilon$  – Coeficiente calculado por  $(235/f_y)^{0.5}$ ;

$\eta$  – Parâmetro definido na EN 1993-1-5, igual à unidade para ser conservativo.

De acordo com o segundo parágrafo do subcapítulo 5.1 da EN 1993-1-5 [67], nos casos em que esta condição se verifique é necessário colocar reforços intermédios na secção transversal. Visto que no projeto e construção dos postes de transmissão é raro a utilização destes reforços, o presente trabalho também evitará a utilização dos mesmos.



# 5

## DIMENSIONAMENTO

### 5.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo trata-se todas as considerações e processos tidos em conta para o dimensionamento dos vários postes de transmissão, executados com as diferentes classes de aço referidas no capítulo 3, por forma a se aferir as suas diferenças estruturais e económicas. São abordados aspetos como: a geometria, o material de construção, as secções transversais, as ações, as considerações de projeto, a modelação estrutural e o dimensionamento.

Explica-se ainda o funcionamento da aplicação informática desenvolvida em *Excel* com recurso a programação em *Visual Basic*, concretizada pelo autor desta dissertação, com o intuito de calcular as ações do vento (de acordo com a norma EN 1991-1-4 [90]), ações dos cabos, esforços, ações equivalentes devido à partilha de vórtices (“vortex shedding”), segurança à ovalização e segurança à encurvadura de acordo com a EN 1993-1-1 [30], nomeadamente, pelo método geral de verificação da encurvadura por flexão e da encurvadura lateral de componentes estruturais.

No Anexo A2 encontram-se ilustrados os vários módulos de cálculo do programa desenvolvido.

Em simbiose com a utilização desta aplicação recorreu-se ao programa de elementos finitos *Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2015*.

Será também abordado neste ponto todo o processo iterativo afeto ao dimensionamento e otimização.

### 5.2 CONSIDERAÇÕES DE PROJETO

O requisito principal do projeto é desenvolver postes de transmissão com o máximo de eficiência estrutural e economia mas que verifiquem sempre a segurança a todos os níveis. É então necessário encontrar um ponto de equilíbrio entre estes dois fatores tendo por base a alteração de secções transversais e diâmetros. Estas modificações têm impacto direto nas ações do vento na medida em que uma redução da secção traduz-se numa menor área de exposição ao vento e esforços mais pequenos. Por outro lado, secções mais pequenas obrigam a espessuras das chapas metálicas maiores o que se traduz num maior peso próprio da torre com consequente aumento de custos.

Andersen [121] e Smith [103] definem também um conjunto de fatores que permitem realizar uma boa prospeção de projeto de torres de telecomunicações e mastros, sendo estes:

- Coeficientes de forma de elementos que não fazem parte da super-estrutura;
- Formação de gelo em estruturas de aço e a sua probabilidade de ocorrer com vento forte;
- Grau de segurança exigido;
- Área de solo disponível e os acessos ao local de implantação;

- Natureza geológica do terreno;
- Estética;
- Fundações;
- Adequação à disposição estrutural, requisitos, códigos e normas aplicáveis.

A escolha das secções transversais e perfis dos vários membros em torres autoportantes devem ter também em atenção pormenores práticos como por exemplo [121]:

- Preços;
- Prazos de entrega;
- Produção racional e económica;
- Ligações;
- Esbelteza dos membros e tamanhos dos perfis;
- Galvanização em imersão quente;
- Transporte;
- Montagem e instalação;

No presente trabalho alguns destes parâmetros foram admitidos como satisfeitos devido à pouca relevância que apresentam para o presente estudo como é o caso da natureza geológica do terreno, área de solo disponível e acessos, prazos de entrega, produção racional e económica, ligações e instalação.

## 5.3 CARACTERÍSTICAS DOS POSTES

### 5.3.1 LOCALIZAÇÃO

Para a localização dos postes analisados admitiu-se um terreno cujas características correspondem à Zona B (arquipélagos dos Açores e da Madeira e as regiões do continente situadas numa faixa costeira com 5 km de largura a altitudes superiores a 600 m) e à categoria 0 (Mar ou zona costeira exposta aos ventos do mar), ambas definidas na EN 1991-1-4 [90]. Considerou-se uma densidade do ar igual a  $1,25 \text{ kg/m}^3$ , um fator de orografia ( $S$ ) de 0,5 e um declive moderado de 7% para a vertente virada a barlavento.

### 5.3.2 GEOMETRIA

Cada estrutura é composta por uma torre piramidal com uma altura proposta de 46,5 metros cujo fuste é formado por chapas metálicas tubulares cónicas que podem possuir uma secção octogonal, dodecagonal, hexadecagonal e icosagonal (admitida neste estudo como circular - Figura 5.1) e que podem ser constituídas por várias classes de aço diferentes – S235, S275, S355, S450, S500, S550, S620 e S690.

As restantes geometrias seccionais, cujos polígonos têm 6, 10 ou 18 faces, não foram consideradas por apenas possuírem um eixo de simetria.

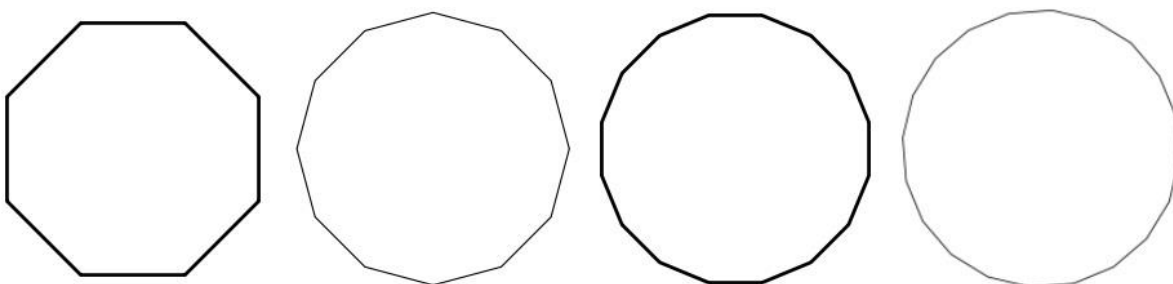


Figura 5.1 – Secções transversais consideradas: octógono, dodecágono, hexadecágono e icoságono

Visto que o limite de comprimento para o transporte de peças e componentes nos contentores marítimos (12 metros) não pode exceder os 11,9 metros foi necessário dividir o poste em 5 módulos estruturais: 4 módulos com 10 metros de altura e um restante com 6,5 metros instalado no topo do fuste.

Considerou-se módulos de 10 metros de altura útil ao invés de 11,9 metros para ter em atenção possíveis ligações por encaixe (“Slip-Joint”) as quais obrigam à sobreposição destes troços num comprimento da ordem de 1,5 vezes o diâmetro da secção (Figura 5.2) [91].

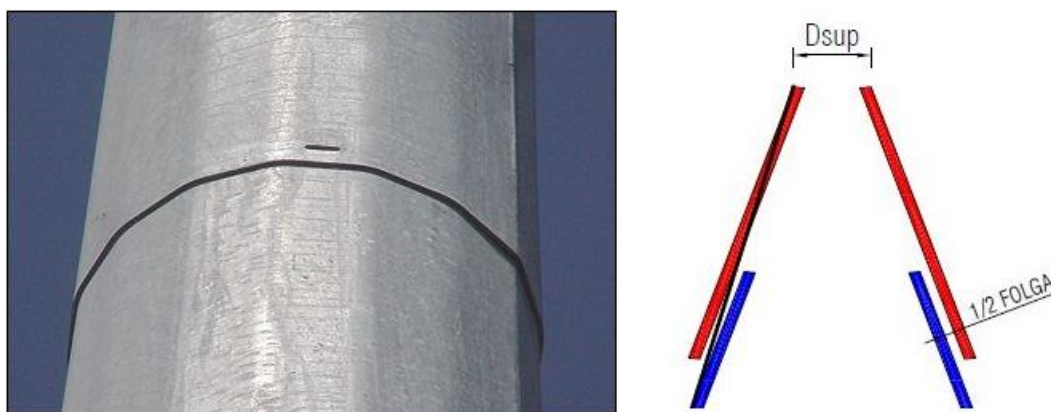


Figura 5.2 – Ligação por encaixe [122], [91]

Cada um destes módulos é fabricado com uma chapa de determinada espessura que varia conforme as necessidades de resistência e rigidez do projeto. A espessura mínima de utilização do Eurocódigo 3 é 3mm enquanto a espessura máxima considerada é de 20mm devido às limitações da maquinaria de quinagem das chapas existentes na Metalgalva.

No topo da estrutura existem oito braços para a instalação dos cabos de transmissão dispostos simetricamente relativamente ao eixo do poste: dois braços para os cabos de guarda nos 46,5 metros e seis braços adjacentes para os condutores, colocados em par às alturas de 22,5 metros, 32,5 metros e 42,5 metros.

As estruturas utilizadas para os braços, recomendadas pela Metalgalva, indicam as seguintes características:

- Braços dos cabos de guarda: 2 metros de comprimento, secção dodecagonal com 350mm de diâmetro na base e 200mm na extremidade, espessura de 6mm e aço S355;
- Braços dos cabos condutores: 4 metros de comprimento, secção dodecagonal com 500mm de diâmetro na base e 350mm na extremidade, espessura de 8mm e aço S355.

Os diâmetros utilizados na base dos postes encontram-se limitados superiormente nos 1800mm visto que para esta dimensão a flange de encastramento irá ter aproximadamente 2100mm, o que é o máximo permitido para ser possível galvanizar na Metalgalva. O limite inferior é condicionado pela resistência do aço empregue e pelo limite máximo de 20mm de espessura das chapas.

No topo, os diâmetros considerados como coerentes são 200mm, 350mm e 500mm o que permite obter jorramentos do fuste entre 35mm/m (máximo admitido pela Metalgalva para secções circulares) e 20mm/m. Jorramentos inferiores são habitualmente menos eficientes.



Figura 5.3 – Exemplo de um poste de características semelhantes [123]

#### 5.4 AÇÕES DOS CABOS DE TRANSMISSÃO

As forças nodais equivalentes provenientes dos cabos, a serem inseridas nas extremidades dos braços aquando a modelação, foram calculadas previamente para um caso semelhante e facultadas gentilmente pela Metalgalva e apresentam-se na Figura 5.4, no Quadro 5.1 e no Quadro 5.2.

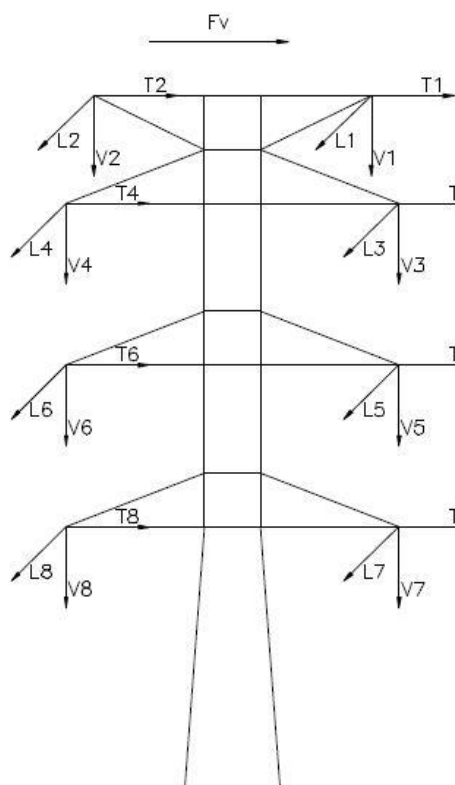


Figura 5.4 – Diagrama de forças e localização dos cabos de transmissão no topo do poste

O caso de estudo corresponde a um poste de transmissão de alinhamento no qual foram consideradas as duas ocorrências mais condicionantes:

- Direção do vento em rajada no sentido transversal ao alinhamento dos cabos:

Quadro 5.1 - Forças nodais equivalentes dos cabos de transmissão para o caso de vento transversal em rajada

Altura	Localização do cabo	Ti (kN)	Li (kN)	Vi (kN)
46,5m	1	11,98	0	-7,76
46,5m	2	11,98	0	-7,76
42,5m	3	47,27	0	-37,52
42,5m	4	47,27	0	-37,52
32,5m	5	45,26	0	-37,52
32,5m	6	45,26	0	-37,52
22,5m	7	43,25	0	-37,52
22,5m	8	43,25	0	-37,52

- Direção do vento no sentido transversal ao alinhamento com rebentamento de um cabo:

Quadro 5.2 - Forças nodais equivalentes dos cabos de transmissão para o caso de vento transversal e rebentamento de um cabo

Altura	Localização do cabo	Ti (kN)	Li (kN)	Vi (kN)
46,5m	1	0,20	0	-7,76
46,5m	2	0,20	0	-7,76
42,5m	3	1,32	-21,71	-11,07
42,5m	4	4,41	0	-37,52
32,5m	5	4,28	0	-37,52
32,5m	6	4,28	0	-37,52
22,5m	7	4,14	0	-37,52
22,5m	8	4,14	0	-37,52

Todas estas cargas foram obtidas através da Norma EN 50341-1 [101] e possuem uma majoração de 200%. Este coeficiente de segurança é normalmente uma imposição do cliente.

## 5.5 COMBINAÇÃO DE AÇÕES

A combinação de ações utilizada para o dimensionamento corresponde ao Estado Limite Último encontra-se referida no ponto 3.6 do capítulo de Ações Regulamentares.

## 5.6 MODELAÇÃO

A escolha da utilização do programa de elementos finitos *Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2015* para a modelação das estruturais recai sobretudo no facto do autor já possuir algum grau de conhecimento sobre o mesmo. Por outro lado, este programa é utilizado pela Metalgalva o que facilita a troca de conhecimentos e possíveis dúvidas entre o autor e o Departamento técnico da Metalgalva.

### 5.6.1 MODELAÇÃO GEOMÉTRICA

A primeira etapa de qualquer simulação estrutural passa pela sua modelação geométrica. Esta pode ser realizada dentro do próprio programa de elementos finitos, já referido, ou através da importação de dados geométricos (coordenadas de nós e barras) provenientes de uma base de dados em *Excel*, através da importação de desenhos geométricos realizados num programa *CAD* ou estes dois últimos em conjunto. Para a construção de modelos de estruturas de grande complexidade a utilização dos programas *CAD* permite um processo mais célere e eficiente visto que estes são já destinados para a construção de desenhos.

No presente caso, visto que a geometria geral dos postes de transmissão analisados é constante e simples (no estudo apenas se modificam as secções transversais do fuste), a modelação foi realizada directamente no programa de elementos finitos através de 17 nós, 5 elementos de barra a representar os módulos do corpo do poste e 8 elementos de barra a representar os diversos braços, como é ilustrado na Figura 5.5.

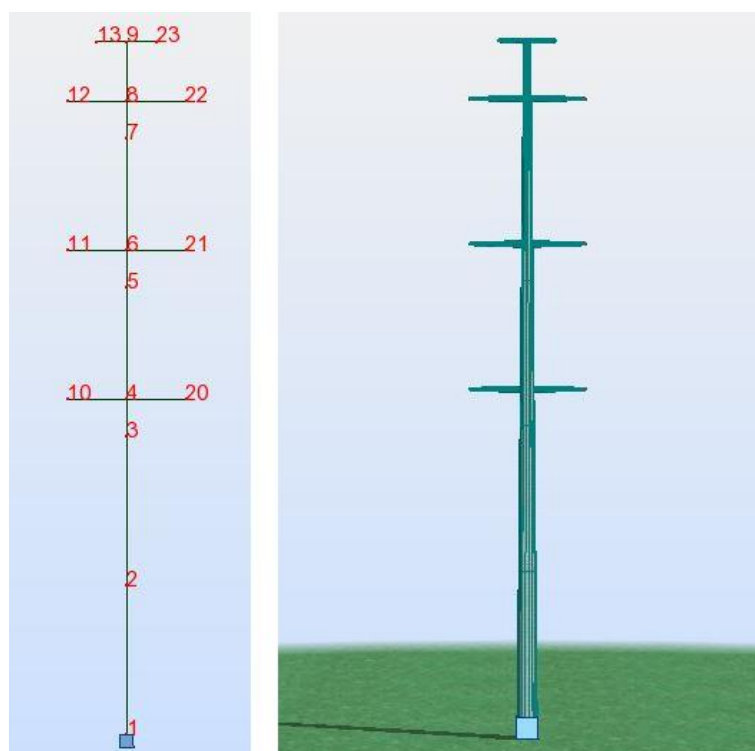


Figura 5.5 – Modelação do poste de transmissão em barras e nós

Na modelação estrutural admitiu-se, também, um apoio na base que restringe todos os deslocamentos e rotações (encastramento perfeito - Figura 5.6)). Isto é uma simplificação da realidade na medida em que as fundações de qualquer estrutura nunca são integralmente rígidas. Contudo, visto que não é objetivo desta tese o seu estudo e como não se conhece os vários parâmetros do terreno que permitiriam uma modelação correta das fundações considerou-se este cenário que também é bastante próximo da realidade.

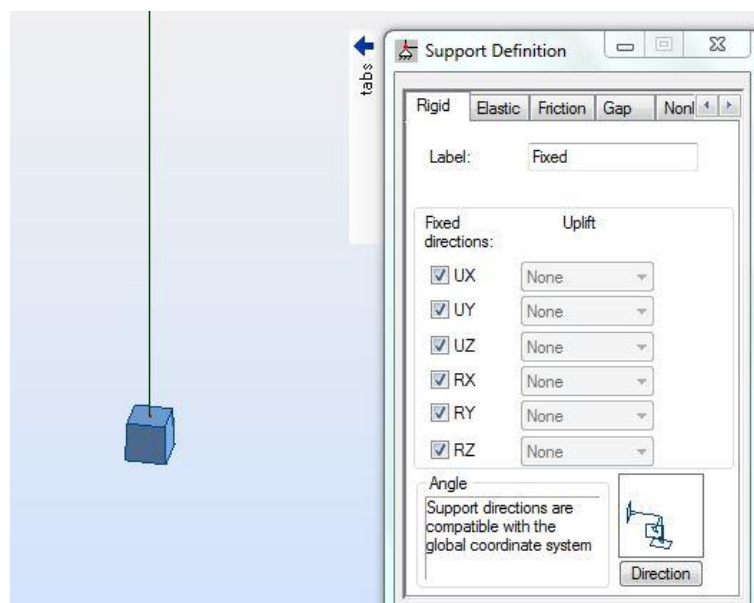


Figura 5.6 – Apoio rígido em todas as direções

Na definição das características das secções transversais dos braços e módulos do fuste foram admitidas, de uma forma simplificada, conexões rígidas entre todos os elementos pelo que não foi modelado qualquer ligação por flange ou por encaixe, a definição das secções é ilustrada na Figura 5.7.

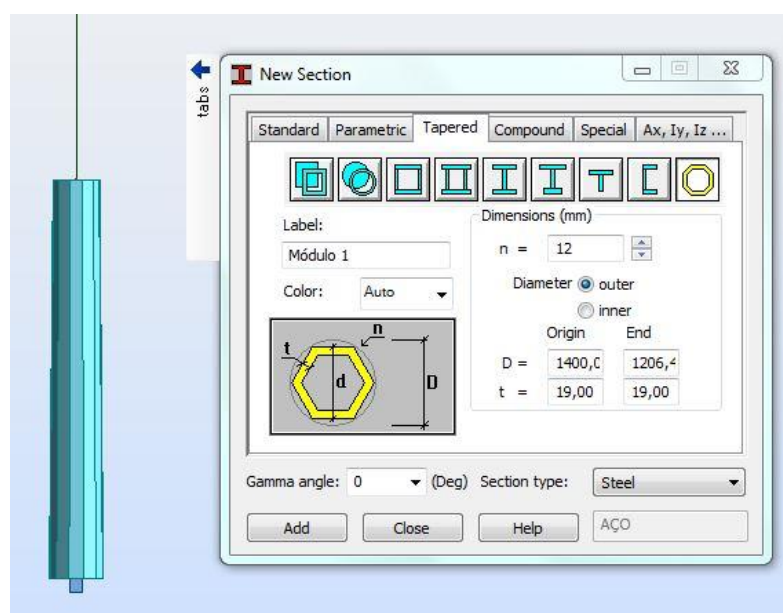


Figura 5.7 – Exemplo de uma introdução das características da secção transversal correspondente ao primeiro módulo do fuste

### 5.6.2 MODELAÇÃO DA AÇÃO DOS CABOS

A introdução das ações dos cabos no protótipo foi realizada através das forças nodais apresentadas no subcapítulo 5.4 e colocadas nos nós correspondentes às extremidades dos braços do poste. A Figura 5.8 representa a modelação das forças no programa *Robot Structural Analysis Professional 2015*.

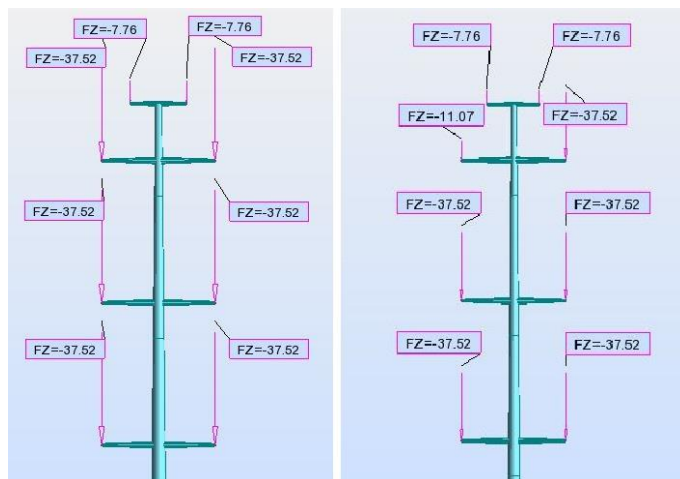


Figura 5.8 – Forças verticais que simulam a presença dos cabos de transmissão (kN) em ambos os casos considerados no dimensionamento (situação normal à esquerda e rebentamento de um cabo à direita)

### 5.6.3 ANÁLISE MODAL

Para o cálculo da ação do vento, nomeadamente o coeficiente estrutural, é necessário o cálculo da frequência fundamental de vibração da estrutura (primeiro modo de vibração). Para tal recorreu-se a uma análise modal executada no programa de elementos finitos.

Considerou-se que as forças verticais provenientes dos cabos de transmissão se comportam como massas equivalentes. Com efeito, o procedimento adotado no programa de elementos finitos para a introdução das massas equivalentes foi a conversão das forças nodais em massas nodais, como se mostra na Figura 5.9.

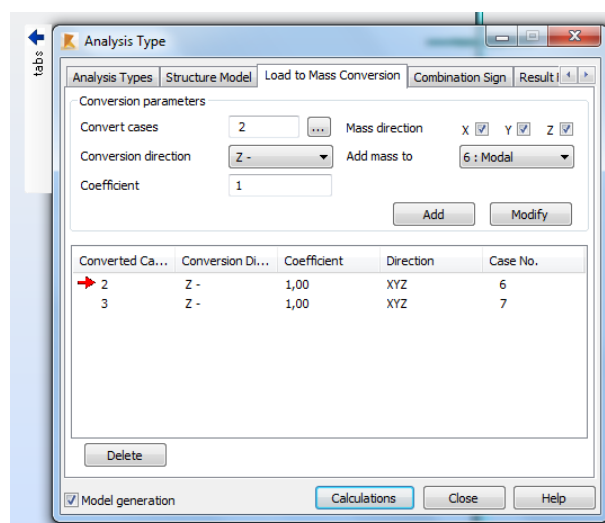


Figura 5.9 – Conversão das forças nodais em massa



A Figura 5.10 representa os parâmetros escolhidos para a análise modal.

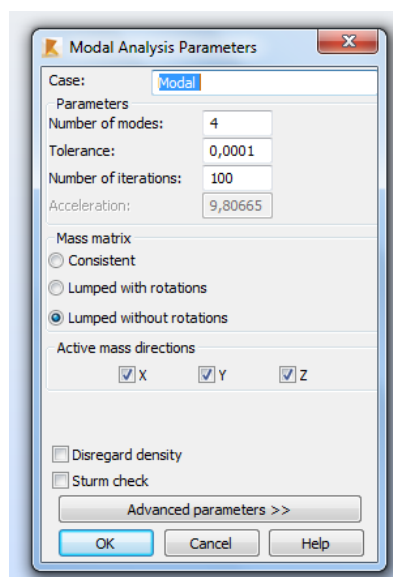


Figura 5.10 – Parâmetros de cálculo da análise modal

#### 5.6.4 ANÁLISE DE ENCURVADURA

Para a verificação de segurança de acordo com o método geral de verificação da encurvadura por flexão e encurvadura lateral, apresentado no ponto 4.7 do capítulo 4, é necessário o cálculo do valor mínimo do fator de amplificação a aplicar às ações de cálculo para se atingir o carregamento crítico elástico ( $\alpha_{cr}$ ).

Com este intuito considerou-se uma análise de encurvadura para a combinação de ações utilizada, encontrando-se os parâmetros escolhidos nas Figura 5.11 e Figura 5.12.

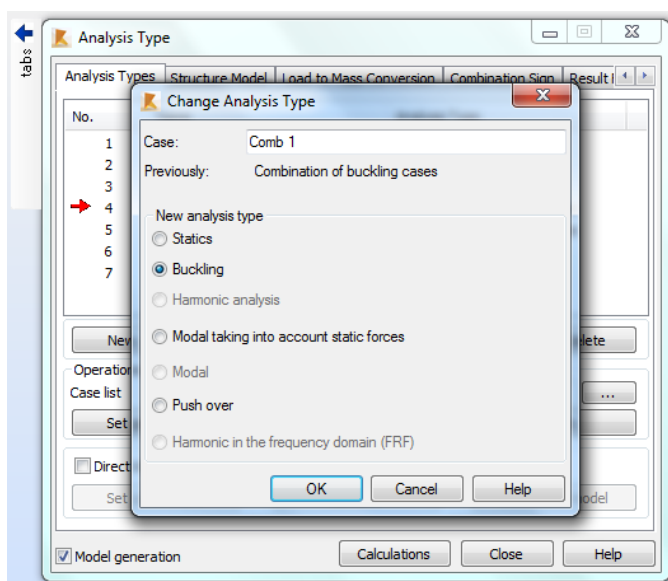


Figura 5.11 – Análise de encurvadura (Buckling) para a combinação de ações

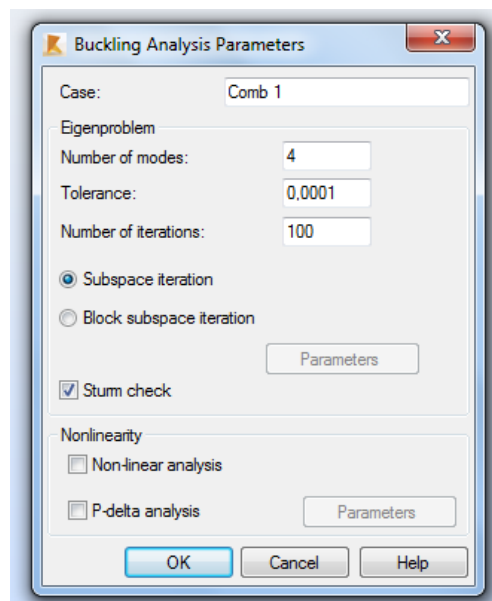


Figura 5.12 – Parâmetros da análise de encurvadura

## 5.7 DIMENSIONAMENTO DOS POSTES

### 5.7.1 PROGRAMA INFORMÁTICO DE DIMENSIONAMENTO

Para a realização deste estudo foi necessário dimensionar diferentes postes de transmissão, com diferentes características geométricas e seccionais, diferentes ações do vento e cabos condutores e diferentes classes de aço. Isto permite gerar uma população de resultados exequíveis (postes que verifiquem a segurança) a partir da qual é possível obter o poste de transmissão mais económico e eficiente como também produzir algumas comparações e conclusões mais relevantes.

Assim, qualquer género de cálculo manual torna-se inviável ou dispendioso tendo em conta as grandes variabilidades já referidas. Como tal, tornou-se fundamental elaborar um método de cálculo que permitisse obter as ações do vento, esforços, resistências e segurança, tudo de forma automática e célere e para qualquer geometria e características mecânicas do poste. Deste modo foi desenvolvida uma aplicação informática com uma metodologia de cálculo através do *Visual Basic* em ambiente *Excel*. Este programa foi realizado pelo autor e baseia-se nas regras de cálculo que as Normas EN 1991-1-4 [90], EN 1993-1-1 [30], EN 1993-1-5 [67], EN 1993-1-12 [72], EN 1993-3-1 [73] e EN 50341-1 [101] preconizam, tal como explicado nos capítulos anteriores.

O início do programa tem por base a escolha dos seguintes parâmetros:

- Características físicas do poste:
  - Altura;
  - Nível de discretização da altura desejado para o cálculo;
  - Diâmetro no topo e na base;
  - Geometria da secção transversal do fuste: polígono com 6, 8, 10, 12, 16, 18 faces ou circular (20 faces);
  - Classe de aço de fabrico: S235, S275, S355, S450, S500, S550, S620 e S690;
  - Tipo de acabamento externo: aço galvanizado, pintura aplicada à pistola, revestimento por pintura liso, aço de superfície lisa, metal polido ou superfície com ferrugem;
  - Raio de curvatura da quinagem aquando o fabrico;

- Fatores de amortecimento externo: por exemplo dispositivos de amortecimento. É de se referir que se ignorou o efeito benéfico do amortecimento externo exercido pela presença dos cabos de transmissão;
  - Tamanho e espessura dos vários módulos constituintes do poste;
  - Frequência fundamental, proveniente do programa de elementos finitos;
  - Coeficiente crítico do primeiro modo de encurvadura, proveniente do programa de elementos finitos.
- Características da zona de implantação e atmosfera:
    - Localização: zona A ou zona B do território Português;
    - Categoria do terreno: desde uma zona costeira exposta aos ventos do mar até uma zona onde pelo menos 15% da superfície está coberta por edifícios com uma altura média superior a 15 metros;
    - Coeficiente “S” relativo à posição do poste de transmissão em falésias e escarpas ou em colinas isoladas ou em cadeia;
    - Inclinação da vertente do solo virada a barlavento;
    - Densidade do ar envolvente;
    - Coeficiente de turbulência do vento;
    - Direção principal do vento.
- Ações dos cabos de guarda e condutores:
    - Altura individual de cada braço e respetivo cabo;
    - Comprimento de cada braço;
    - Diâmetro na base e na extremidade de cada braço;
    - Geometria da secção transversal dos braços: polígono com 6, 8, 10, 12, 16, 18 faces ou circular;
    - Espessura da secção transversal de cada braço;
    - Raio de curvatura da quinagem aquando o fabrico dos braços;
    - Força nodal vertical de cada cabo a aplicar na extremidade do braço;
    - Força nodal transversal de cada cabo a aplicar na extremidade do braço;
    - Força nodal longitudinal de cada cabo a aplicar na extremidade do braço.
- Fatores de majoração das forças para efeitos de combinação:
    - Peso próprio;
    - Ação do vento;
    - Ação dos cabos;

Na Figura 5.13 apresenta-se interface do programa onde se pode observar os vários elementos a preencher.

Características Gerais do Poste

Altura:	46,5 m
Diâmetro no Topo:	350 mm
Diâmetro na Base:	1800 mm
Jorramento:	31,18 mm/m
Geometria Seção Transversal:	8
Classe de Aço:	S 550
Frequência Fundamental (Hz):	0,38
Discretização da altura (m):	0,5

Dimensionamento

Calcular			
Ovalização:	O.K.	F. máx V.S. (kN)	0,034
Encurvadura por Ved	O.K.	Ved <= Vrd	O.K.
Interação M-V			O.K.
Encurvadura Método Geral			1,0028
Massa total do Poste (Ton)			15,986
Área total de Pintura (m2)			153,04

Cálculo da Ação do Vento

Zona:	Zona B
Categoria de Terreno	0
Orografia - Factor "S" - Anexos Nac.	0,5
Inclinação da vertente virada a barlavento - $\Phi$	0,07
Densidade do ar - $\rho$ (kg/m3)	1,25
Coefficiente de Turbulência - KI	1

Zona B - Os arquipélagos dos Açores e da Madeira e as regiões do continente situadas numa faixa costeira com 5 km de largura a altitudes superiores a 600 m (vb,0 = 30 m/s)

0 - Mar ou zona costeira exposta aos ventos do mar

O EC1 recomenda o valor de 1,25 kg/m3

O EC1 recomenda o valor de 1,0

Ação dos Cabos

Caso de Carga - Apoio de Suspensão em Alinhamento										
Cabos	Altura	i	Tr (kN)	Li (kN)	Vr (kN)	L Braço (m)	Diâmetro máx. (mm)	Diâmetro mín. (mm)	Diâm. médio (mm)	Espessura (mm)
Cabo de Guarda 1 (Esq.)	46,5 m	1	11,98	0	-7,76	2	350	200	275	6
Cabo de Guarda 2 (Dir.)	46,5 m	2	11,98	0	-7,76	2	350	200	275	6
Nível 1 - Cabo 1 (Esq.)	42,5 m	3	47,27	0	-37,52	4	500	200	350	8
Nível 1 - Cabo 2 (Dir.)	42,5 m	4	47,27	0	-37,52	4	500	200	350	8
Nível 2 - Cabo 1 (Esq.)	32,5 m	5	45,26	0	-37,52	4	500	200	350	8
Nível 2 - Cabo 2 (Dir.)	32,5 m	6	45,26	0	-37,52	4	500	200	350	8
Nível 3 - Cabo 1 (Esq.)	22,5 m	7	43,25	0	-37,52	4	500	200	350	8
Nível 3 - Cabo 2 (Dir.)	22,5 m	8	43,25	0	-37,52	4	500	200	350	8
Geometria dos Braços		12								
				Raio de curvatura do canto:			10 mm	Direção Principal do Vento		
								Y		

Fatores de Majoração

Peso Próprio	1,1
Ação do Vento (com ef. 2ª ordem)	1,4
Ação dos Cabos	1,0

Figura 5.13 – Interface inicial do programa desenvolvido pelo autor

Dentro da mesma interface existe um botão “Calcular” que inicia toda a metodologia de cálculo afeta ao dimensionamento, que é representada pelo fluxograma da Figura 5.14.

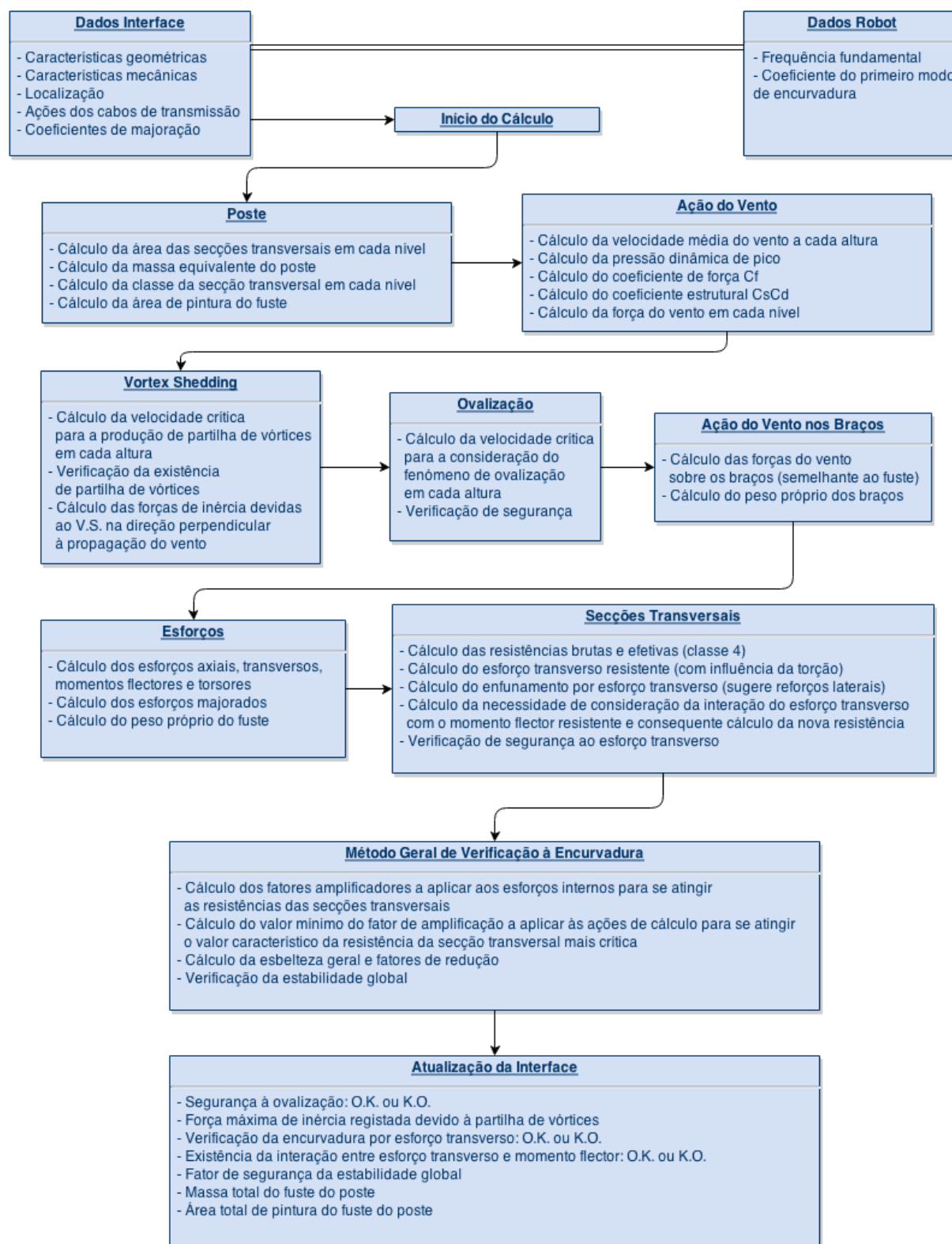


Figura 5.14 – Esquema da metodologia de cálculo do programa de dimensionamento produzido pelo autor

Após o cálculo automático finalizar são apresentados na interface do programa os resultados, sendo estes (Figura 5.15):

- Segurança à ovalização;
- Força máxima de inércia registada devido à partilha de vórtices;
- Verificação da encurvadura por esforço transversal;
- Existência de interação entre esforço transversal e momento flector;
- Fator de segurança da estabilidade global (obtido pela aplicação do método geral de verificação da encurvadura por flexão e da encurvadura lateral de componentes estruturais, presente no ponto 6.3.4 da EN 1993-1-1 [30] e apresentada no capítulo 4 desta dissertação);
- Massa total do fuste do poste;
- Área total de pintura do fuste do poste.

Dimensionamento			
Calcular			
Ovalização:	O.K.	F. máx V.S. (kN)	0,034
Encurvadura por Ved	O.K.	Ved <= Vrd	O.K.
Interação M-V		O.K.	
Encurvadura Método Geral		1,0028	
Massa total do Poste (Ton)		15,986	
Área total de Pintura (m2)		153,04	

Figura 5.15 – Quadro com os resultados gerais do dimensionamento

### 5.7.2 PROCESSO DE DIMENSIONAMENTO

Tendo em conta a grande quantidade de variáveis físicas e mecânicas que um poste de transmissão pode possuir torna-se fundamental estabelecer uma metodologia de trabalho para que o dimensionamento dos inúmeros mastros deste estudo seja realizado de forma organizada e eficiente.

Desta forma o autor assumiu uma metodologia de execução de dimensionamento baseada nas seguintes premissas:

- Dividir os postes de análise em três grandes famílias, distinguidos pelo diâmetro no topo do fuste: 200mm, 350mm e 500mm;
- Dentro de cada família separar os postes em grupos conforme o seu diâmetro na base: desde 1800mm até um limite mínimo (definido pela segurança global do poste onde o máximo de espessura da chapa modular permitida é 20mm) com variações de 100mm;
- Em cada grupo (com diâmetros fixos) dimensionar para cada classe de aço constituinte quatro postes, cada um com uma secção transversal poligonal de 8, 12, 16 ou 20 lados (considerado como circular).

Por fim, para realização do dimensionamento de um único poste de transmissão, cuja altura, diâmetros, secção transversal e classe de aço já se encontra pré-definidos, é apenas necessário um processo iterativo com o intuito de se obter as mínimas espessuras nos vários módulos do fuste de modo a garantir a segurança geral em estado limite último. Para tal arbitrou-se espessuras de 20mm para os 5 módulos constituintes do fuste a partir do qual se iniciou o processo de otimização representado no esquema da Figura 5.16.

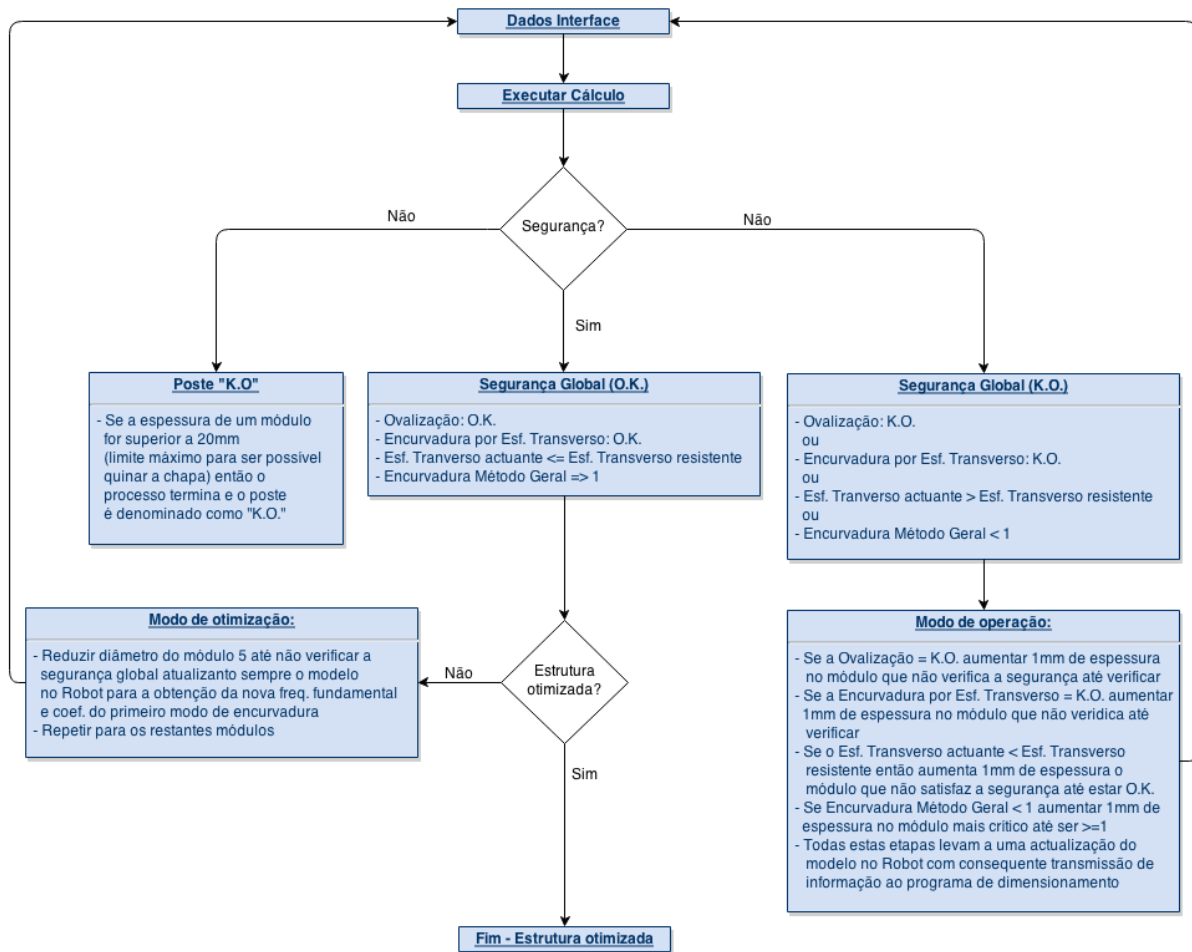


Figura 5.16 – Processo de dimensionamento

Através deste método verificou-se que o diâmetro mínimo na base que permite o dimensionamento de um poste de transmissão sem comprometer a segurança é de 1300mm para um aço de fabrico de classe S690. Por outro lado, os aços S235 e S275 não conseguiram garantir a segurança para um diâmetro na base de 1800mm (máximo permitido para o fabrico) pelo que estes foram excluídos da população de postes de transmissão criada.

Os diâmetros na base considerados foram então: 1800mm, 1700mm, 1600mm, 1500mm, 1400mm e 1300mm. No fim deste processo foram contabilizadas 296 soluções possíveis, para o dimensionamento do poste de transmissão considerado, que verificam a segurança e estabilidade global (apresentados no Anexo A1).

### 5.7.3 RESULTADOS

Por forma a simplificar a visualização da matriz de resultados possíveis elaborou-se gráficos para cada diâmetro no topo e base e com o peso do fuste em função da classe de aço com que é fabricado. Cada gráfico possui ainda quatro curvas as quais correspondem ao tipo de secção transversal utilizada nos postes.

### 5.7.3.1 Família de postes de transmissão com 200mm de diâmetro no topo

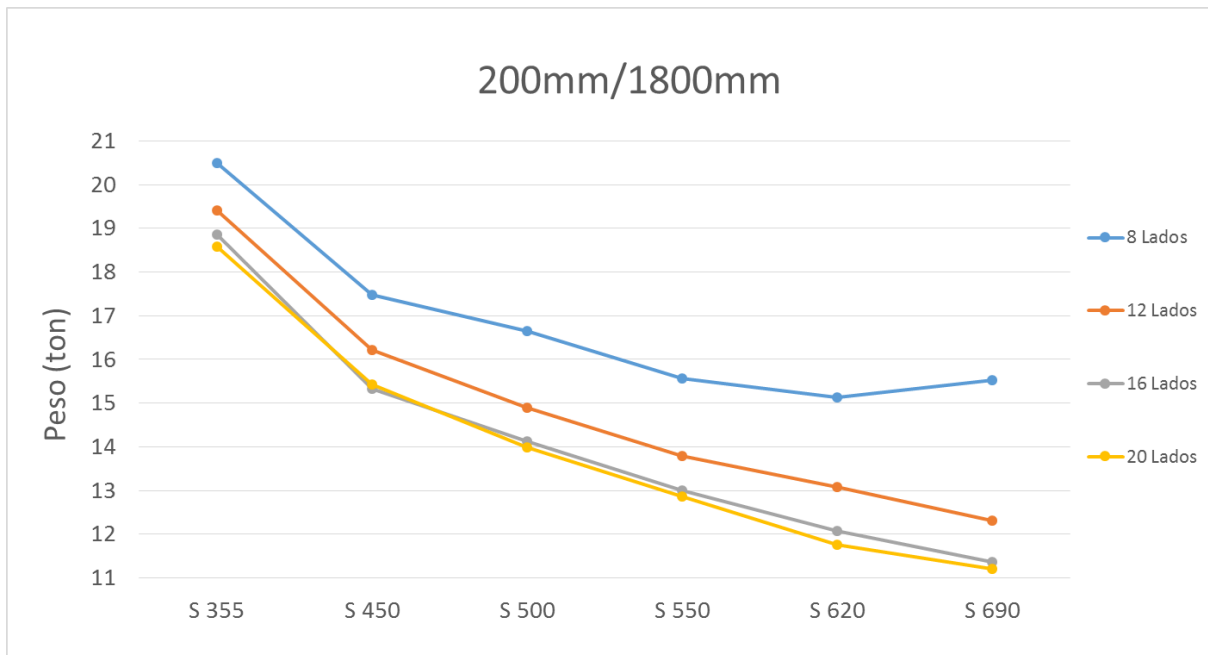


Figura 5.17 – Peso de cada solução de dimensionamento para diâmetros de 200mm no topo e 1800mm na base

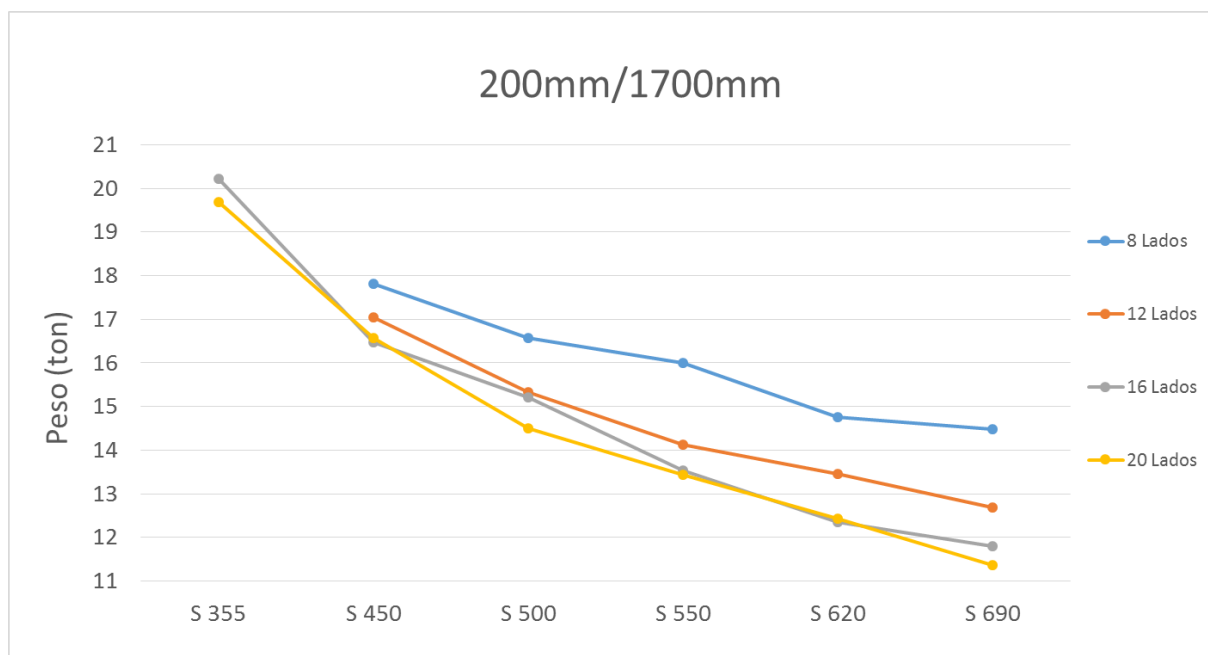


Figura 5.18 – Peso de cada solução de dimensionamento para diâmetros de 200mm no topo e 1700mm na base



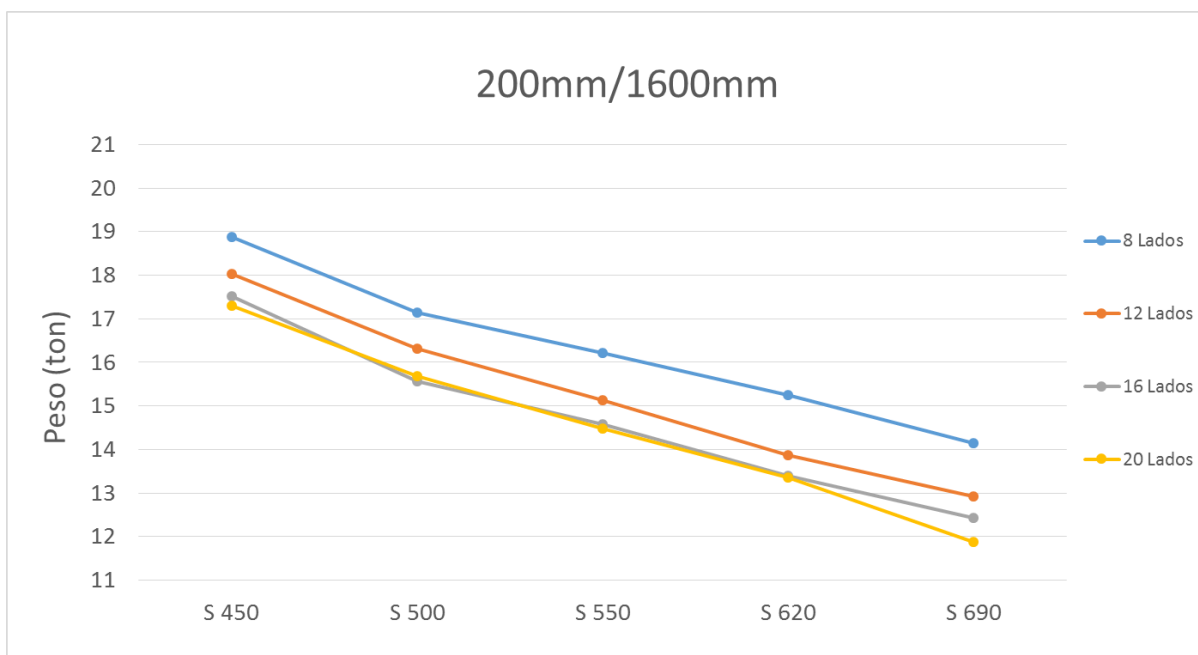


Figura 5.19 – Peso de cada solução de dimensionamento para diâmetros de 200mm no topo e 1600mm na base

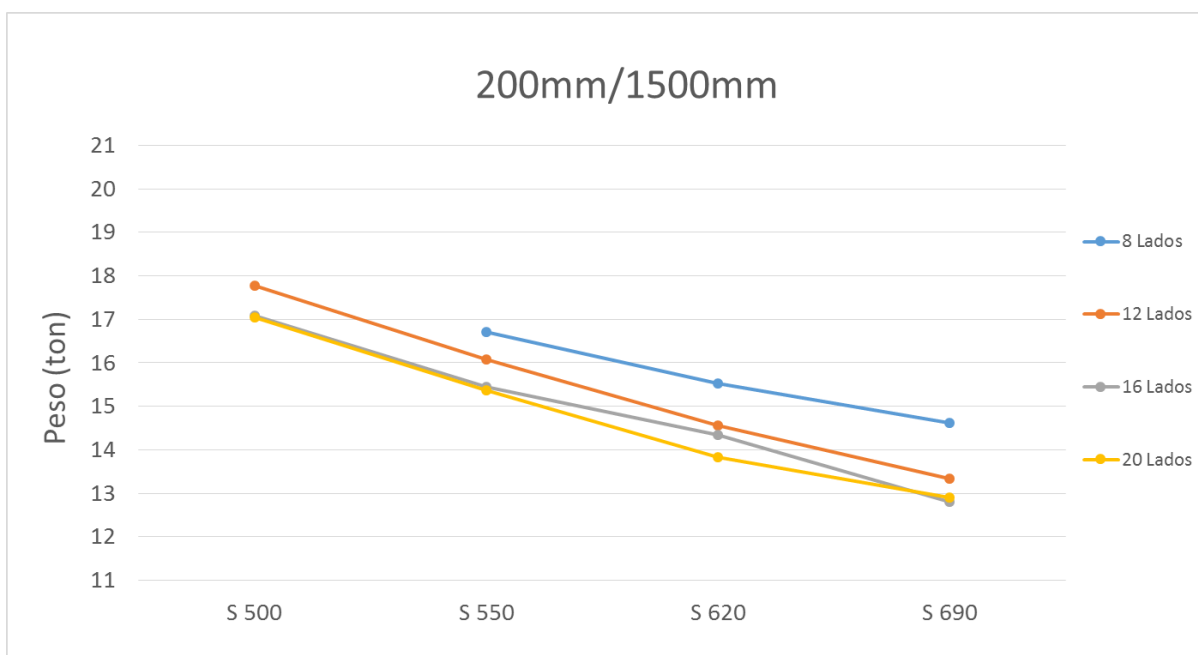


Figura 5.20 – Peso de cada solução de dimensionamento para diâmetros de 200mm no topo e 1500mm na base

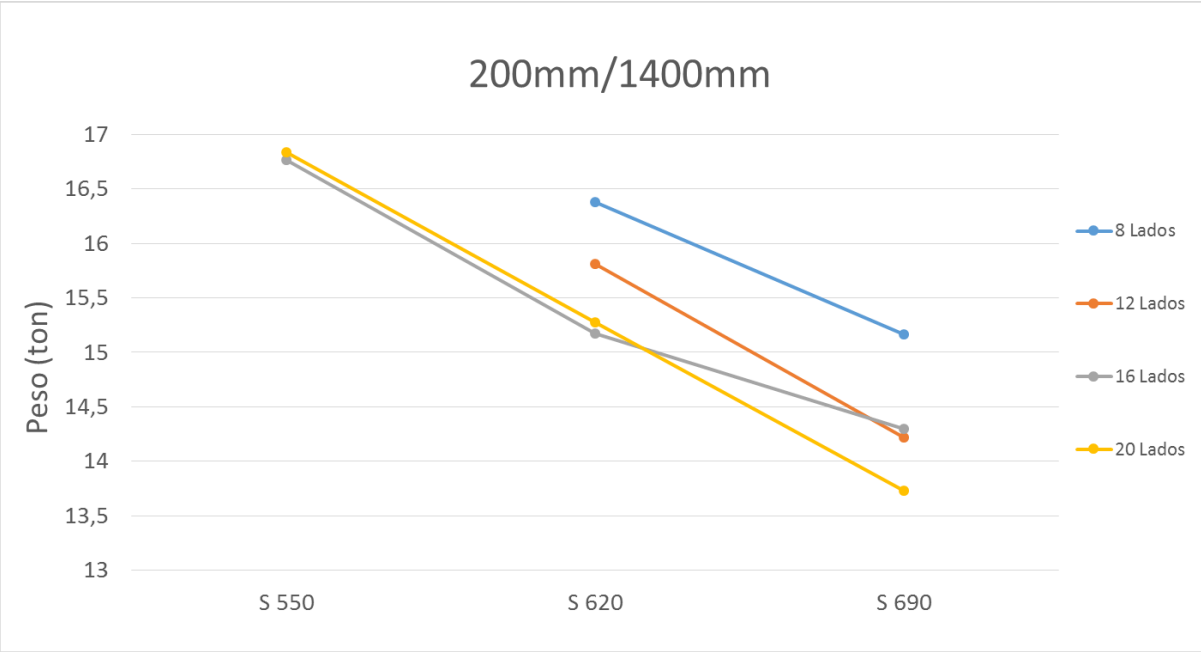


Figura 5.21 – Peso de cada solução de dimensionamento para diâmetros de 200mm no topo e 1400mm na base



Figura 5.22 – Peso de cada solução de dimensionamento para diâmetros de 200mm no topo e 1300mm na base

### 5.7.3.2 Família de postes de transmissão com 350mm de diâmetro no topo

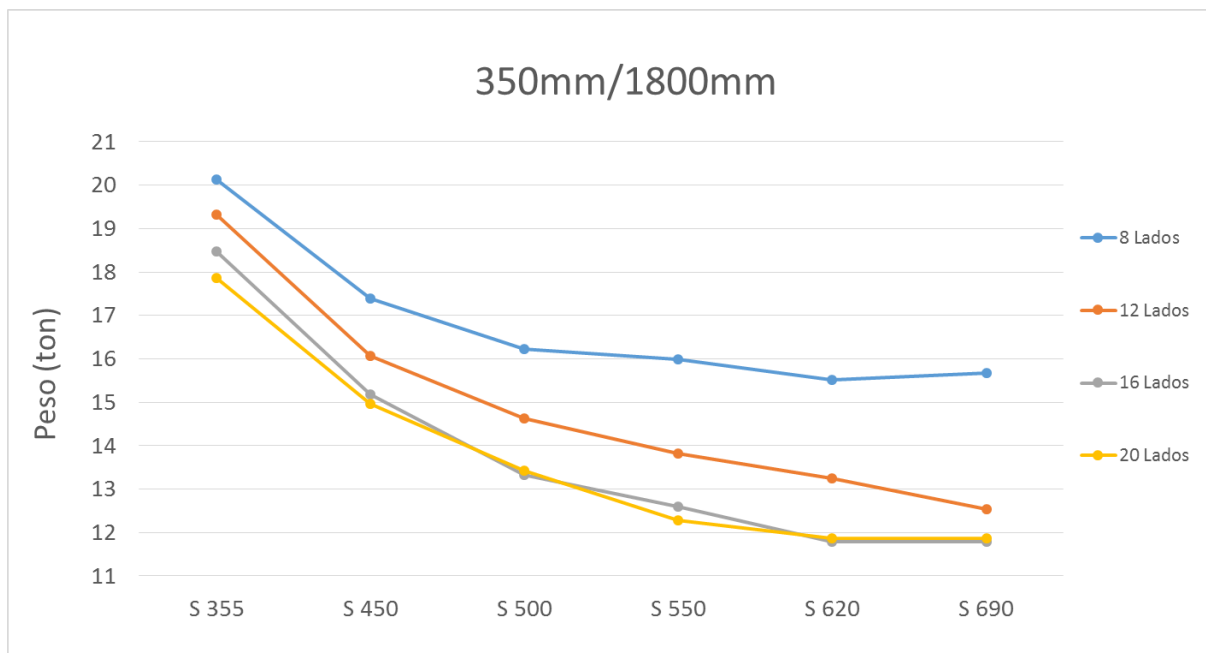


Figura 5.23 – Peso de cada solução de dimensionamento para diâmetros de 350mm no topo e 1800mm na base

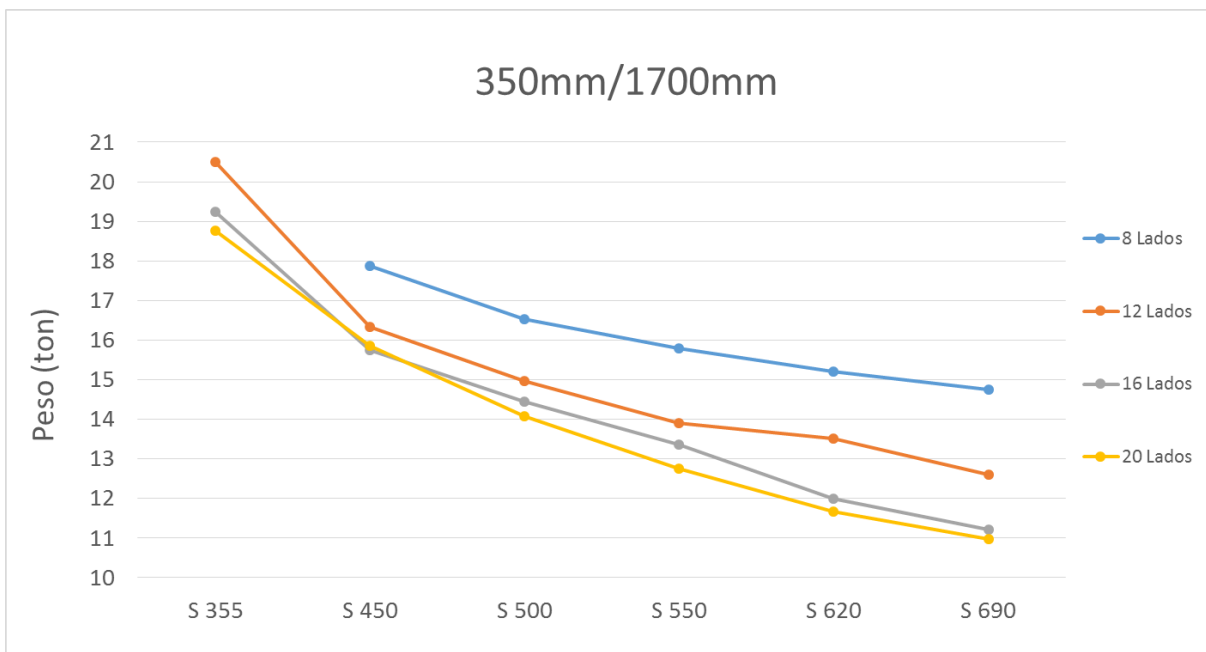


Figura 5.24 – Peso de cada solução de dimensionamento para diâmetros de 350mm no topo e 1700mm na base

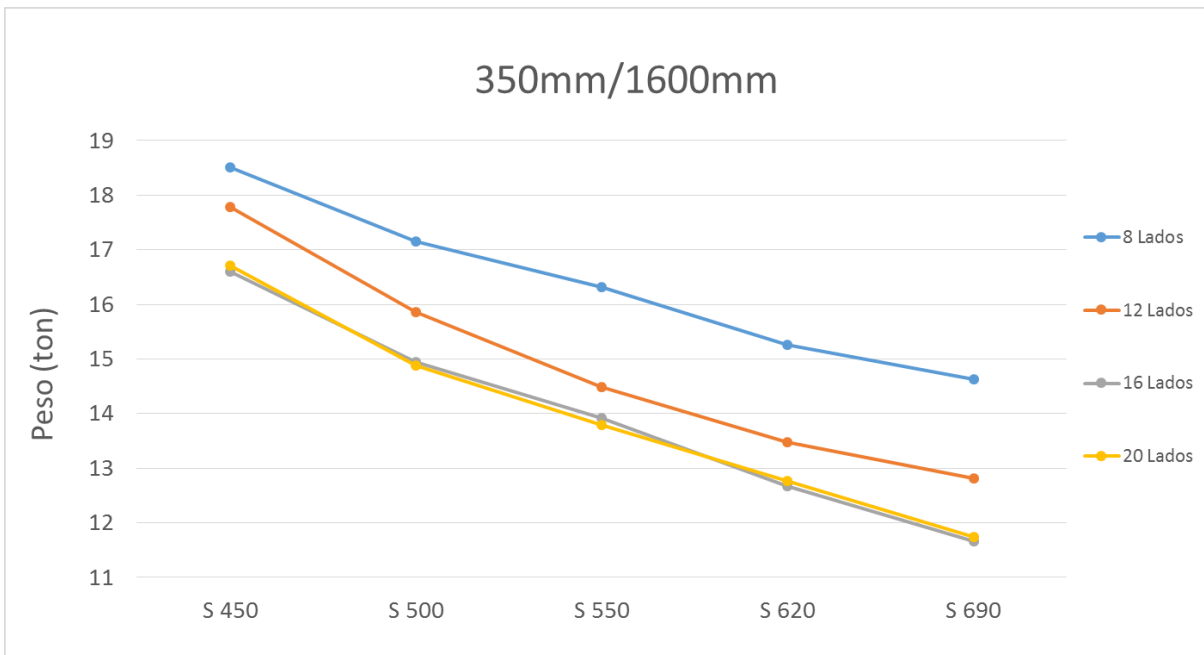


Figura 5.25 – Peso de cada solução de dimensionamento para diâmetros de 350mm no topo e 1600mm na base

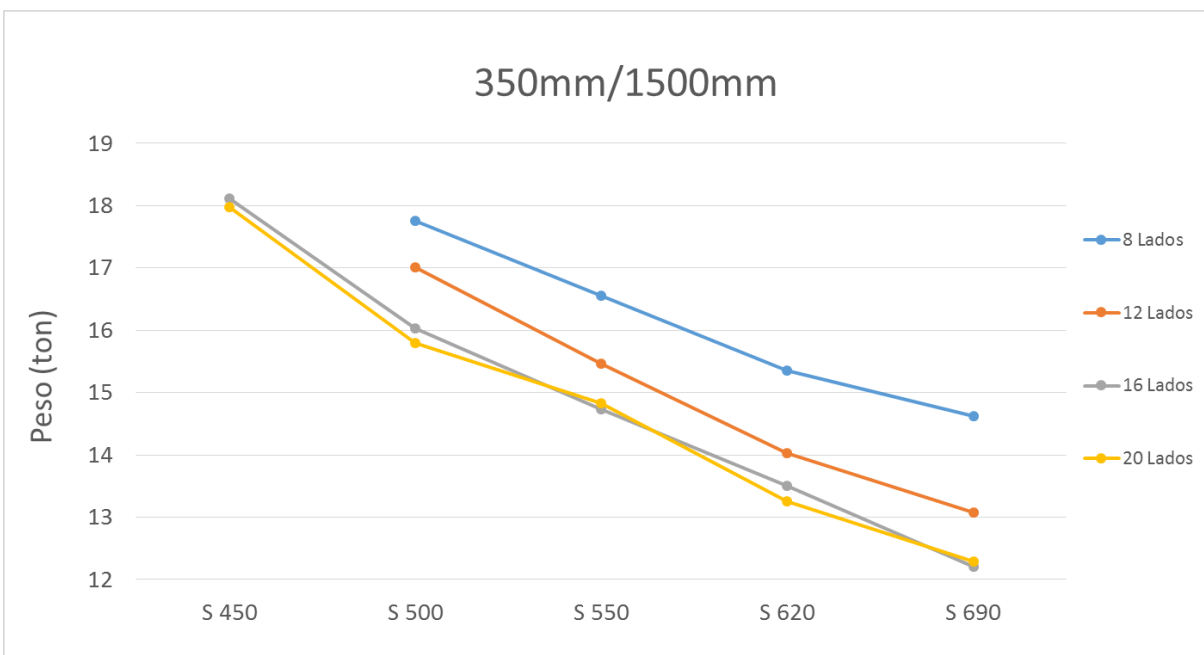


Figura 5.26 – Peso de cada solução de dimensionamento para diâmetros de 350mm no topo e 1500mm na base

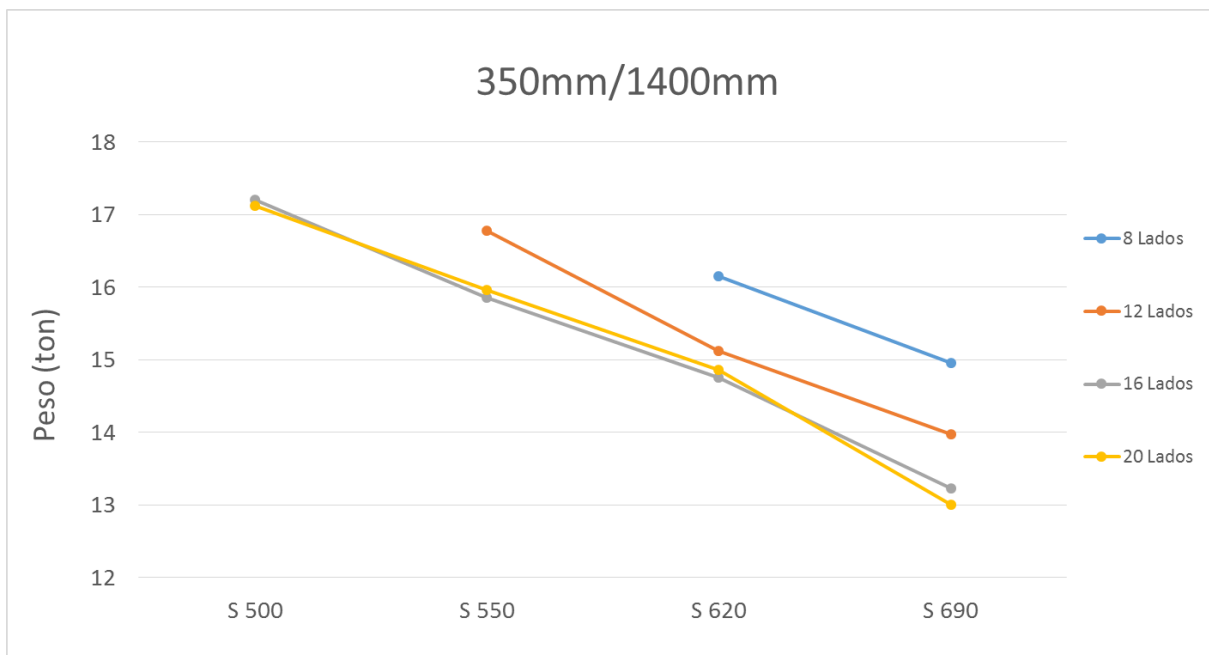


Figura 5.27 – Peso de cada solução de dimensionamento para diâmetros de 350mm no topo e 1400mm na base

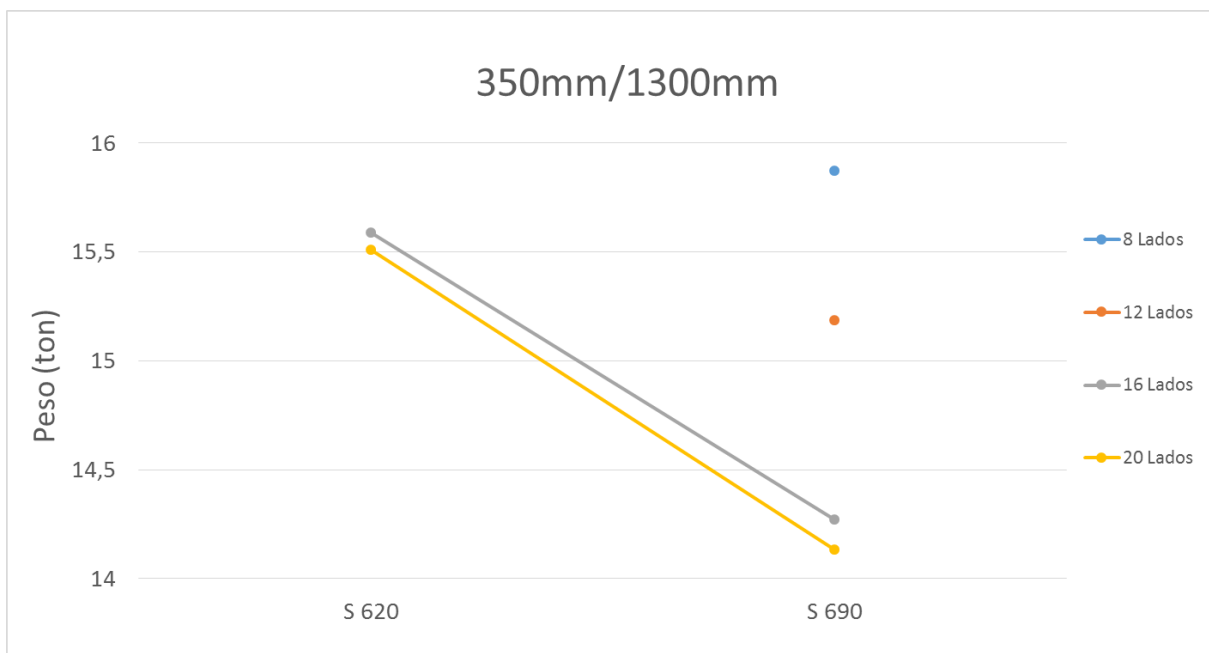


Figura 5.28 – Peso de cada solução de dimensionamento para diâmetros de 350mm no topo e 1300mm na base

### 5.7.3.3 Família de postes de transmissão com 500mm de diâmetro no topo

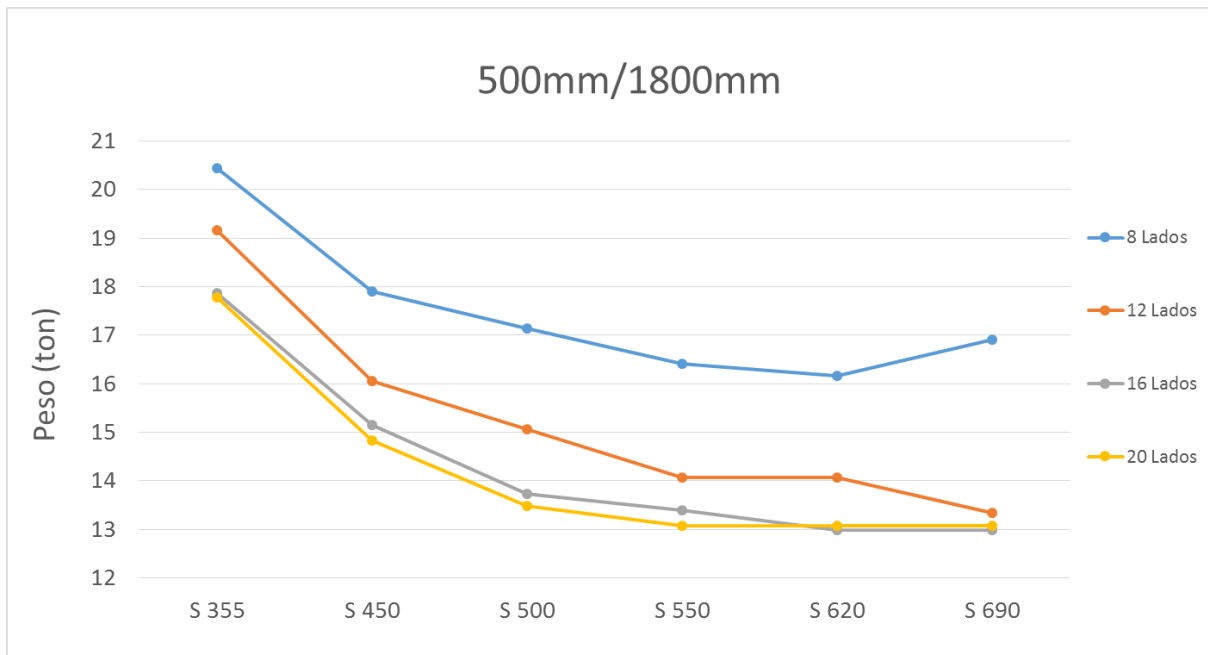


Figura 5.29 – Peso de cada solução de dimensionamento para diâmetros de 500mm no topo e 1800mm na base

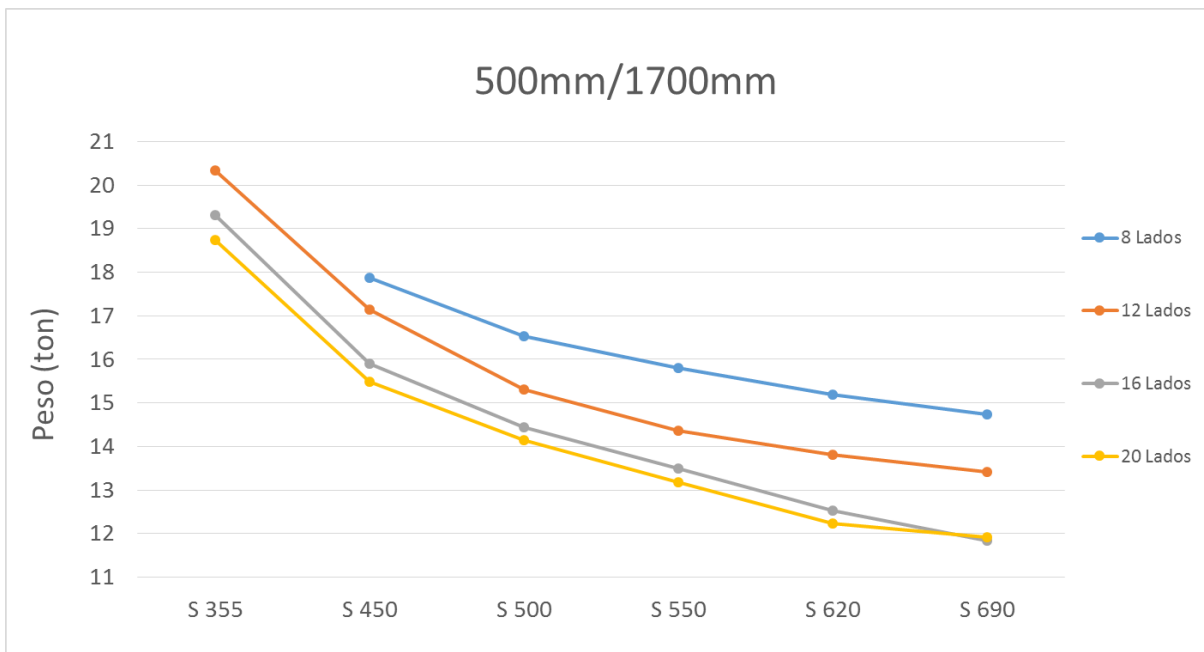


Figura 5.30 – Peso de cada solução de dimensionamento para diâmetros de 500mm no topo e 1700mm na base

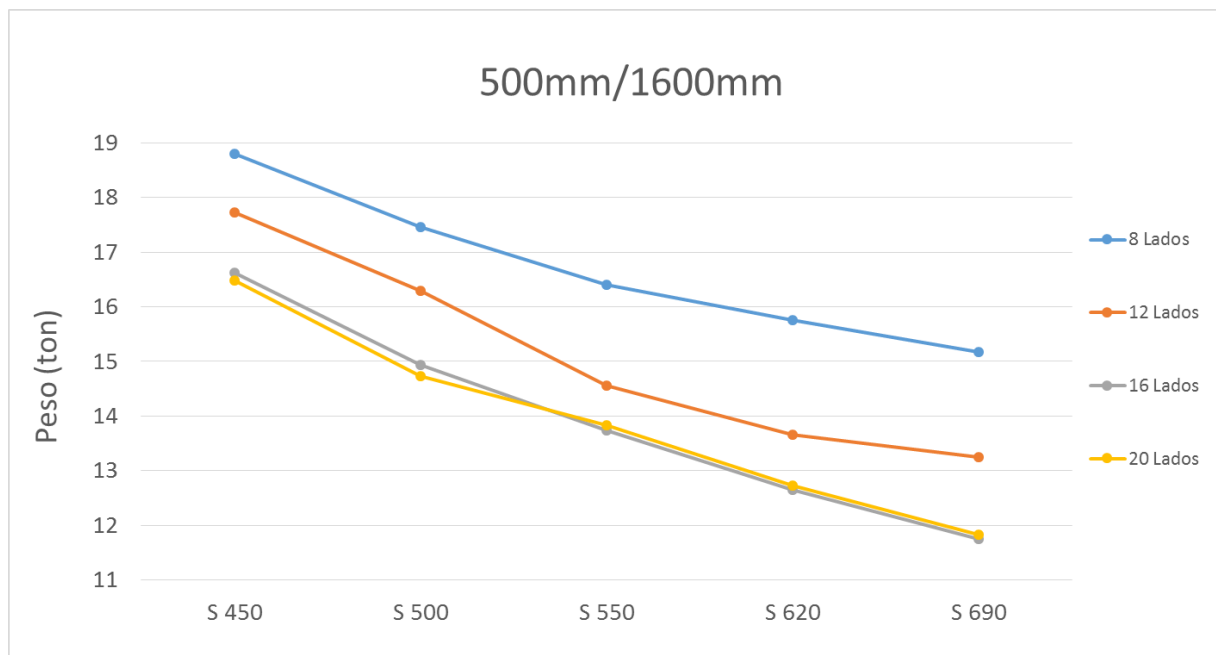


Figura 5.31 – Peso de cada solução de dimensionamento para diâmetros de 500mm no topo e 1600mm na base

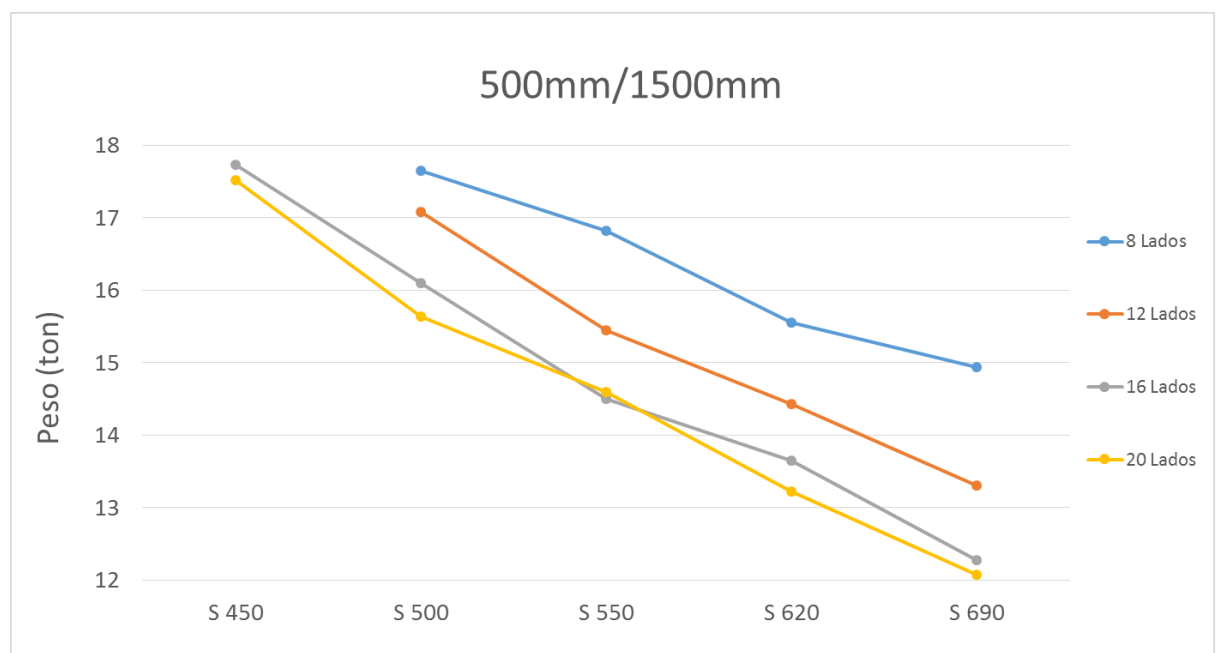


Figura 5.32 – Peso de cada solução de dimensionamento para diâmetros de 500mm no topo e 1500mm na base

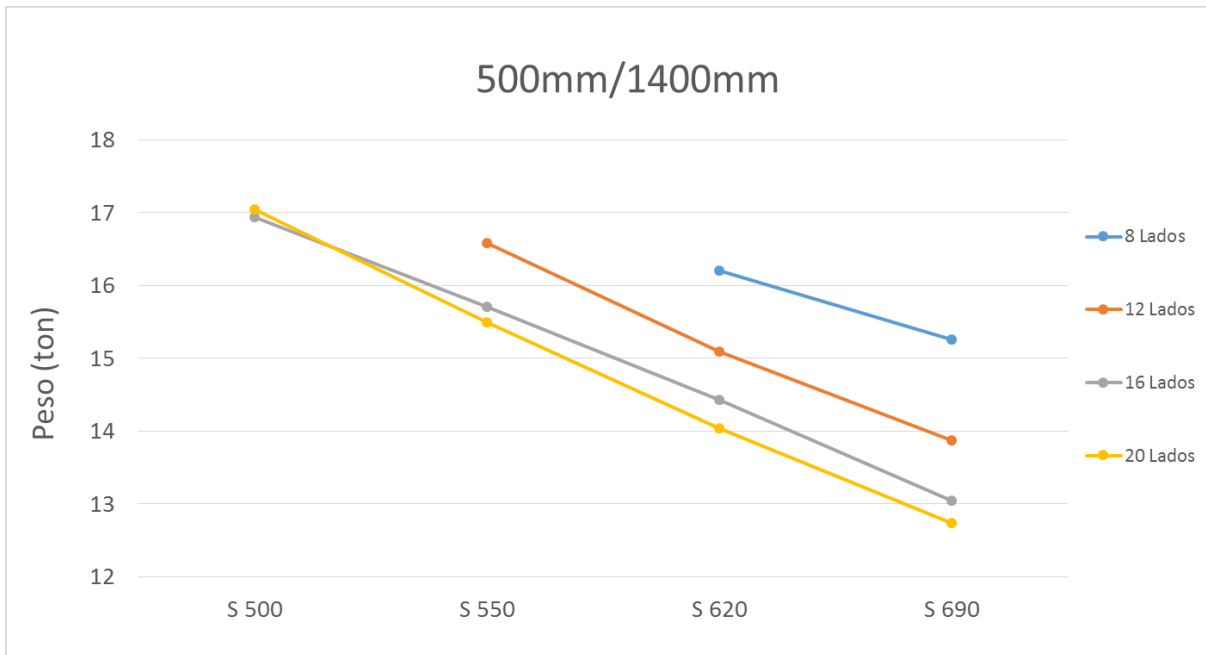


Figura 5.33 – Peso de cada solução de dimensionamento para diâmetros de 500mm no topo e 1400mm na base

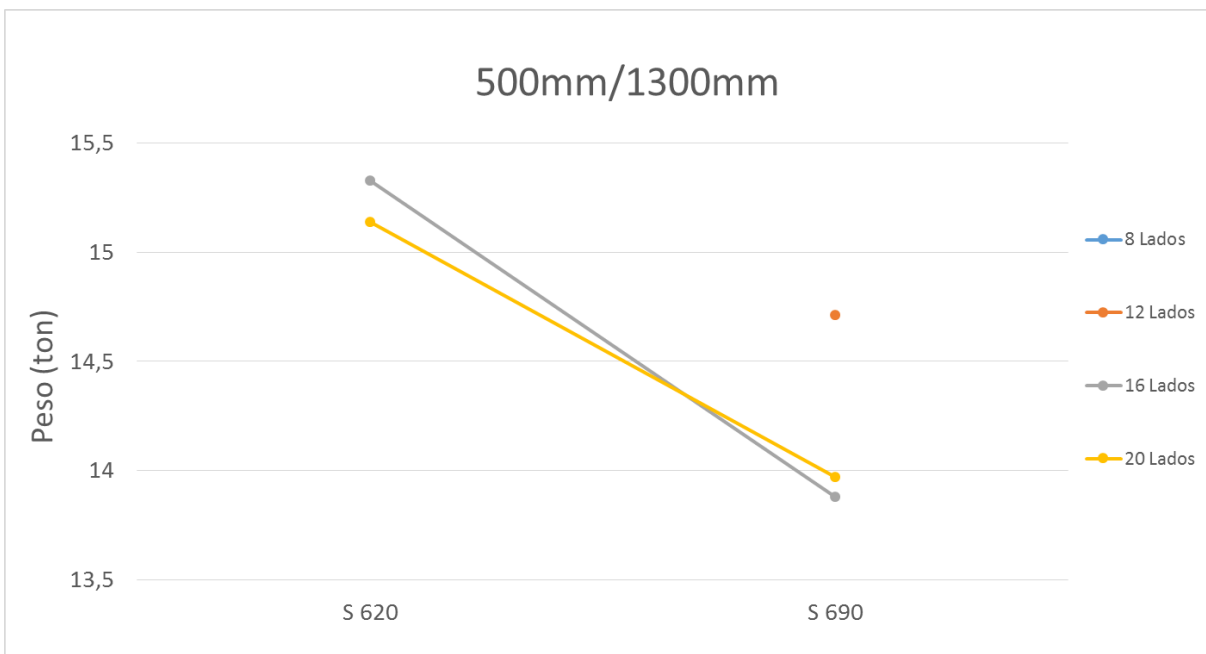


Figura 5.34 – Peso de cada solução de dimensionamento para diâmetros de 500mm no topo e 1300mm na base



#### 5.7.3.4 Análise dos resultados obtidos

Conforme se pode observar nos gráficos algumas das curvas intersectam-se, possuem máximos no seu corpo, começam a crescer após uma determinada classe de aço ou ainda surgem pontos que, teoricamente, se deveriam posicionar abaixo de outros pontos correspondentes a postes equivalentes mas com uma secção transversal mais reduzida. Estes acontecimentos usufruem das seguintes explicações:

À medida que se aumenta a classe do aço é presumível conseguir-se verificar a segurança do poste com espessuras mais reduzidas em cada módulo e, conseqüentemente, obter um menor peso do fuste. Contudo, conforme se vai diminuindo as espessuras, os fatores condicionantes deixam de ser as resistências características de cada secção (caso geral) e passam a ser, sobretudo, a ovalização e a encurvadura por esforço transversal. Este fenómeno obriga a dimensionar postes de transmissão com espessuras maiores nos seus módulos apesar de se utilizarem aços com maiores resistências.

De forma análoga, um aumento do número de faces do polígono da secção transversal do fuste origina um acréscimo de resistências na secção que permite a utilização de espessuras de chapa menores. No entanto, nem sempre é possível reduzir ainda mais as espessuras acabando-se por se obter postes com as mesmas características modulares (e não inferiores) que fustes com uma secção poligonal com menor índice de faces. Isto provoca o aparecimento pontual de postes mais pesados e com um fator de segurança de estabilidade geral maior devido à existência de uma secção transversal com maior área útil de aço e formato mais próximo da circunferência.

Por vezes também se verifica a existência de alguns máximos no corpo intermédio das curvas. Este fenómeno deve-se ao facto do poste, dimensionado teoricamente de acordo com a linha de tendência da curva, se encontrar no limiar de segurança muito próximo mas inferior ao admissível. Isto significa que algum dos módulos constituintes do poste vai ser obrigado a ter uma espessura superior ao que era suposto visto que não verifica a segurança por apenas valores ínfimos. Conseqüentemente o mesmo fuste irá ter um peso superior ao expectável e se tornará um ponto externo à linha de tendência.



## 6 ANÁLISE DE CUSTOS

### 6.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo procede-se à apresentação de alguns dos custos essenciais de fabrico associados a um poste de transmissão. São expostos os preços médios conforme a classe de aço utilizada, geometria da secção transversal, soldaduras, galvanização e pintura final.

Por fim realiza-se uma comparação dos custos de produção de cada caso, dentro das 296 soluções de dimensionamento para o tipo de poste de transmissão considerado, com o intuito de se obter a solução mais económica.

### 6.2 AÇOS

A escolha do tipo de aço é um dos parâmetros mais importantes a nível de projeto na medida em que pode influenciar bastante os resultados estruturais finais bem como os próprios preços de fabrico.

Deste modo, existem vários fatores preponderantes quando se define o tipo de aço a utilizar na produção de postes de transmissão nomeadamente [91]:

- Preço do aço: é variável ao longo do tempo conforme os preços da matéria-prima, demanda de mercado e quantidade encomendada;
- Disponibilidade do material no mercado: por vezes o aprovisionamento de uma determinada classe de aço é complexa e difícil o que obriga a uma reserva/encomenda antecipada (podendo ser cerca de 6 meses) por forma a evitar preços especulativos;
- Limitações geométricas, tais como diâmetros máximos para transporte ou galvanização ou até por razões estéticas;
- Comportamentos em estados limite de serviço: por exemplo limites de deslocamentos máximos no topo do poste.

Para a realização deste estudo económico, foram sugeridos pela Metalgalva os preços médios praticados à data da dissertação, apresentados no Quadro 6.1:

Quadro 6.1 - Preços médios de cada classe de aço

Classe de aço	Preço (€/Ton)	%
S 355	650	100
S 450	720	+ 10,8
S 500	750	+ 15,4
S 550	775	+ 19,2
S 620	810	+ 24,6
S 690	840	+ 29,2

Para as duas últimas classes, os valores foram obtidos por uma regressão logarítmica realizada através dos preços dos restantes aços (Figura 6.1).



Figura 6.1 - Evolução do preço por tonelada conforme a classe de aço

### 6.3 GEOMETRIA DA SECÇÃO TRANSVERSAL

Distintas geometrias do polígono da secção transversal permitem obter diferentes ações do vento (relacionadas com a capacidade de escoamento do vento sobre a estrutura), diferentes resistências e diferentes custos de produção. De uma forma geral, à medida que se incrementa o número de lados do polígono seccional obtêm-se maiores resistências características mas aumenta-se também o preço de fabrico. O principal fator que influencia este parâmetro é o processo de quinagem no qual se realiza a dobragem das chapas de aço (através da prensa por uma lâmina) por forma a se obter a secção transversal desejada (Figura 6.2 e Figura 6.3).



Figura 6.2 - Exemplo de uma chapa dobrada na máquina de quinagem [124]

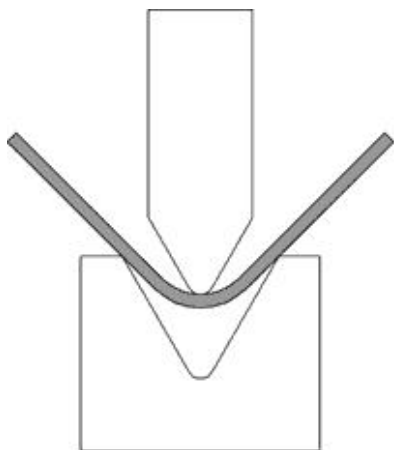


Figura 6.3 - Processo de dobragem de uma chapa metálica na Metalgalva [125], [91]

Os custos monetários afetos a este tipo de procedimento podem ser representados pelos valores médios sugeridos pela Metalogalva, apresentados no Quadro 6.2.

- 4 minutos por quinagem a um preço de 85 euros por hora de trabalho.

Quadro 6.2 - Preço das quinagens

Número de quinagens	Tempo de trabalho (min)	Preço por módulo	%	Preço dos 5 módulos constituintes dos postes dimensionados
8	32	45,3 €	100	227 €
12	48	68,0 €	+ 50	340 €
16	64	90,7 €	+ 100	453 €
20	80	113,0 €	+ 150	567 €

## 6.4 SOLDAS

Para finalizar a construção das secções transversais em chapa após o processo de quinagem é necessário realizar as soldas longitudinais nas quais se deve ter os seguintes cuidados:

- Deve existir uma penetração total da soldadura na chapa [91];
- Nas zonas de ligação por “slip-joint” a secção fêmea deve possuir uma soldadura *reprise* por forma a resistir aos esforços provenientes da pressão da ligação enquanto na secção macho a soldadura deve ser rebarbada na face exterior por forma a não impedir/dificultar o processo de encaixe [91];
- Em caso de aços de alta resistência é necessário cumprir recomendações específicas por parte do fabricante e normas em vigor.

Dois métodos são possíveis para esta função: solda manual realizada por um operário profissional ou solda automática efetuada por um robot especializado.

A escolha entre ambos os métodos recai sobretudo no diâmetro da base do módulo estrutural a ser soldado. Em casos cujo diâmetro é superior a 400mm o procedimento de soldagem é executado pelo automatismo enquanto no caso inverso é realizado manualmente.

De forma semelhante, no primeiro caso são construídas duas soldas ao longo do módulo por forma a unir as duas semi-secções de chapa obtidas pelo processo de quinagem enquanto no último caso apenas uma solda é construída para fechar o polígono da secção transversal (Figura 6.4).

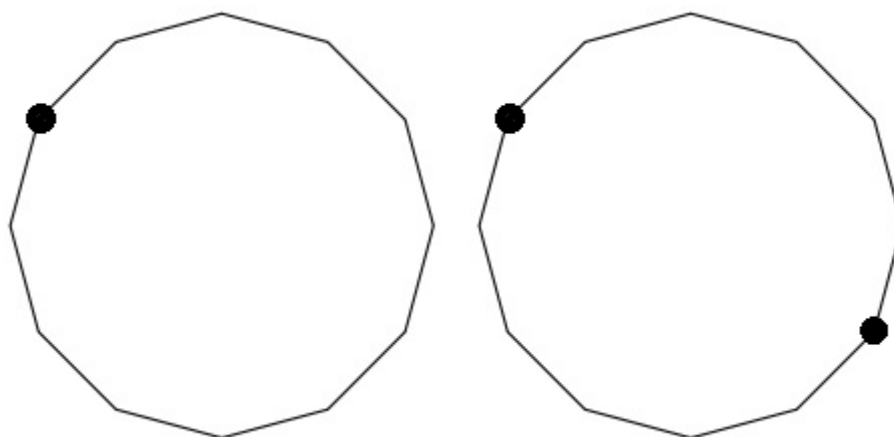


Figura 6.4 - Localização das soldas na secção transversal para diâmetros até 400mm e superior a 400mm

Os preços que a Metalogalva sugere associados a estes procedimentos são:

- Solda manual: 50 minutos por metro a um preço de 80 euros por hora de trabalho;
- Solda por robot: 2,5 minutos por metro a um preço de 110 euros por hora de trabalho (Figura 6.5).

Nas 296 hipóteses de dimensionamento obtidas no capítulo anterior foram registados casos onde os 5 módulos estruturais do fuste eram constituídos por diâmetros na base superior a 400mm e casos onde apenas o último módulo de 6,5 metros possuía diâmetro na base inferior a 400mm. Isto significa que há postes de transmissão cujos módulos são todos soldados por robot e postes onde apenas 1 módulo é soldado manualmente. Assim, pode-se construir o Quadro 6.3 de custos associados ao estudo presente.

Quadro 6.3 - Preço das soldagens

Caso	Tempo de trabalho (min)	Preço soldagem
1 Módulo de 10 metros soldado pelo robot (duas soldas por secção)	50	92 €
1 Módulo de 6,5 metros soldado manualmente (uma solda por secção)	325	433 €
4 Módulos de 10 metros soldados em robot e 1 módulo de 6,5 metros soldado manualmente	200 + 325	800 €
4 Módulos de 10 metros e 1 módulo de 6,5 metros soldados por robot	232	426 €



Figura 6.5 - Execução de uma solda por robot [123]

## 6.5 GALVANIZAÇÃO

Por forma a finalizar e a garantir a longevidade das chapas das secções transversais aplica-se um tratamento anti-corrosivo de galvanização por imersão a quente [123].

Este procedimento caracteriza-se pela criação de uma ligação metálica entre o aço das peças a galvanizar e o zinco, mais concretamente pela imersão da peça num banho de zinco fundido a cerca de 450°C. Isto permite conferir aos produtos fabricados em aço uma elevada resistência à corrosão que não é possível de se obter por outro processo (Figura 6.6).

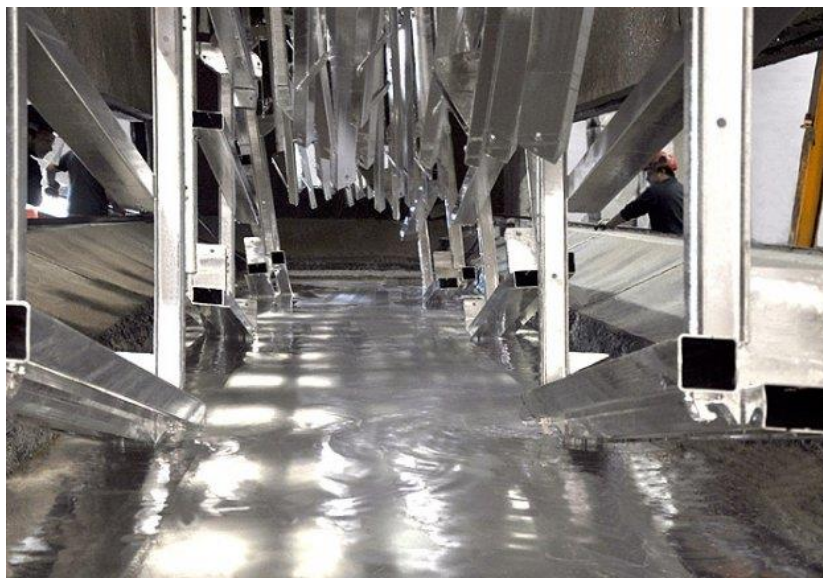


Figura 6.6 - Processo de galvanização [126]

A galvanização foi incorporada na análise de custo de fabrico através da consideração do valor médio, mencionado pela Metalgalva, de 0,45€/Kg de aço ou 450€/Ton.



## 6.6 PINTURA

Após o exercício da galvanização sobre os vários módulos estruturais constituintes do fuste é realizado o trabalho de pintura externa por forma a garantir a aparência externa necessária ou pretendida. O preço associado a este procedimento possui um valor médio referenciado pela Metalgalva de 24€ por metro quadrado de área a pintar.

## 6.7 OUTROS CUSTOS

Dentro do fabrico de um poste de transmissão encontram-se ainda relacionados outros custos que não foram considerados nesta análise como por exemplo: o preço das furações, preços de montagem e preços de movimentações internas. Estes valores não foram tidos em conta na medida em que possuem pouca variabilidade entre as possibilidades de dimensionamento obtidas e são de menor relevância para o preço geral.

Na mesma situação, visto que os braços de suporte aos cabos condutores são semelhantes em todos os casos analisados, os seus custos de fabrico não foram ponderados para o estudo em questão.

Apesar dos custos de transporte não se encontrarem dentro da análise económica de fabrico realizada os mesmos podem possuir alguma relevância para os custos totais (produção, transporte, instalação e manutenção). Por um lado, o transporte de estruturas mais leves permite uma redução do consumo de combustível pelo meio de locomoção e, por outro lado, a construção de estruturas de menores dimensões (por exemplo através de diâmetros mais reduzidos) permite o transporte de mais unidades por viagem.

Um exemplo de poupança sugerido no *website* da empresa Ruukki [127] corresponde ao transporte em camião de peças em aço com um peso de 9300Kg que se altera para 6900Kg no caso de peças equivalentes fabricadas em aço de alta resistência. Admitindo que o camião percorre 150.000Km por ano em circuito extra-urbano (nos quais 50% são em peso vazio) e que o custo do gasóleo é de 1,33€/litro, as poupanças anuais em combustível podem chegar aos 97.887€ o que representa uma economia de 73.599 litros e 207 toneladas de CO<sub>2</sub>.

Os custos de fundações, ligações, instalação e manutenção também não foram incluídos por constituírem temas de alguma complexidade e que não correspondem aos objetivos de abordagem pela presente dissertação.

## 6.8 RESULTADOS

Com base nos preços referidos nos pontos anteriores foi possível realizar uma estimativa do custo de fabrico de cada caso dentro das 296 possibilidades de dimensionamento, obtidas no capítulo anterior, para o poste de transmissão estudado. No Anexo A1 apresenta-se cada caso individual enquanto neste corpo apenas se expõe o caso mais económico dentro de cada classe de aço. De salientar que as expressões “(ov)” ou “(en)” à frente da espessuras dos módulos representam que os mesmos se encontram condicionados pelo fenómeno de ovalização ou encurvadura por esforço transversal.

## 6.8.1 Aço S 355

As características geométricas que permitem obter o fabrico mais económico para o poste de transmissão realizado em aço S 355 são:

Altura:	46,5 m		
Ø Topo:	350 mm		
Ø Base:	1.800 mm		
Jorramento	31,18 mm/m		
Secção Transversal Circular (20 Lados)			
Esp. Mód. 1	16 mm	f (Hz)	,42 Hz
Esp. Mód. 2	16 mm	$\alpha$ cr,N	18,57
Esp. Mód. 3	15 mm	Segurança	1,0073
Esp. Mód. 4	12 mm	Peso	17,869 Ton
Esp. Mód. 5	6 mm	Área Pint.	157,04 m2
Nº Módulos Ø > 400mm		5	
Preço Aço		11.614,9 €	
Preço Quinagens		567,0 €	
Preços Soldas		426,0 €	
Preço Pintura		3.769,0 €	
Preço Galvanização		8.041,1 €	
Preço Total		24.417,9 €	

Figura 6.7 - Características do poste mais económico em fabrico produzido com aço S 355

## 6.8.2 Aço S 450

As características geométricas que permitem obter o fabrico mais económico para o poste de transmissão realizado em aço S 450 são:

Altura:	46,5 m		
Ø Topo:	350 mm		
Ø Base:	1.800 mm		
Jorramento	31,18 mm/m		
Secção Transversal Circular (20 Lados)			
Esp. Mód. 1	14 mm	f (Hz)	,39 Hz
Esp. Mód. 2	13 mm	$\alpha$ cr,N	15,77
Esp. Mód. 3	12 mm	Segurança	1,0034
Esp. Mód. 4	10 mm	Peso	14,966 Ton
Esp. Mód. 5	5 mm	Área Pint.	157,04 m2
Nº Módulos Ø > 400mm		5	
Preço Aço		10.775,5 €	
Preço Quinagens		567,0 €	
Preços Soldas		426,0 €	
Preço Pintura		3.769,0 €	
Preço Galvanização		6.734,7 €	
Preço Total		22.272,2 €	

Figura 6.8 - Características do poste mais económico em fabrico produzido com aço S 450

## 6.8.3 Aço S 500

As características geométricas que permitem obter o fabrico mais económico para o poste de transmissão realizado em aço S 500 são:

Altura:	46,5 m		
Ø Topo:	350 mm		
Ø Base:	1.800 mm		
Jorramento	31,18 mm/m		
Seção Transversal com 16 Lados			
Esp. Mód. 1	12 mm	f (Hz)	,36 Hz
Esp. Mód. 2	12 mm	α cr,N	13,98
Esp. Mód. 3	11 mm	Segurança	1,0120
Esp. Mód. 4	9 mm	Peso	13,328 Ton
Esp. Mód. 5	5 (ov)	Área Pint.	156,03 m2
Nº Módulos Ø > 400mm	5		
Preço Aço	9.996,0 €		
Preço Quinagens	453,0 €		
Preços Soldas	426,0 €		
Preço Pintura	3.744,7 €		
Preço Galvanização	5.997,6 €		
Preço Total	20.617,3 €		

Figura 6.9 - Características do poste mais económico em fabrico produzido com aço S 500

## 6.8.4 Aço S 550

As características geométricas que permitem obter o fabrico mais económico para o poste de transmissão realizado em aço S 550 são:

Altura:	46,5 m		
Ø Topo:	350 mm		
Ø Base:	1.800 mm		
Jorramento	31,18 mm/m		
Secção Transversal Circular (20 Lados)			
Esp. Mód. 1	11 mm	f (Hz)	,36 Hz
Esp. Mód. 2	11 mm	$\alpha$ cr,N	13,26
Esp. Mód. 3	10 mm	Segurança	1,0305
Esp. Mód. 4	8 mm	Peso	12,274 Ton
Esp. Mód. 5	5 (ov)	Área Pint.	157,04 m2
Nº Módulos Ø > 400mm		5	
Preço Aço		9.512,4 €	
Preço Quinagens		567,0 €	
Preços Soldas		426,0 €	
Preço Pintura		3.769,0 €	
Preço Galvanização		5.523,3 €	
Preço Total		19.797,6 €	

Figura 6.10 - Características do poste mais económico em fabrico produzido com aço S 550

### 6.8.5 Aço S 620

As características geométricas que permitem obter o fabrico mais económico para o poste de transmissão realizado em aço S 620 são:

Altura:	46,5 m		
Ø Topo:	350 mm		
Ø Base:	1.700 mm		
Jorramento	29,03 mm/m		
Secção Transversal Circular (20 Lados)			
Esp. Mód. 1	11 mm	f (Hz)	,33 Hz
Esp. Mód. 2	11 mm	$\alpha_{cr,N}$	11,55
Esp. Mód. 3	10 mm	Segurança	1,0191
Esp. Mód. 4	8 mm	Peso	11,678 Ton
Esp. Mód. 5	5 (ov)	Área Pint.	149,74 m2
Nº Módulos Ø > 400mm		5	
Preço Aço		9.459,2 €	
Preço Quinagens		567,0 €	
Preços Soldas		426,0 €	
Preço Pintura		3.593,8 €	
Preço Galvanização		5.255,1 €	
Preço Total		19.301,0 €	

Figura 6.11 - Características do poste mais económico em fabrico produzido com aço S 620

Ou em alternativa:

Altura:	46,5 m		
Ø Topo:	200 mm		
Ø Base:	1.800 mm		
Jorramento	34,41 mm/m		
Secção Transversal Circular (20 Lados)			
Esp. Mód. 1	11 mm	f (Hz)	,33 Hz
Esp. Mód. 2	11 mm	$\alpha_{cr,N}$	10,35
Esp. Mód. 3	10 mm	Segurança	1,0144
Esp. Mód. 4	9 mm	Peso	11,748 Ton
Esp. Mód. 5	6 mm	Área Pint.	146,08 m2
Nº Módulos Ø > 400mm		5	
Preço Aço		9.515,9 €	
Preço Quinagens		567,0 €	
Preços Soldas		426,0 €	
Preço Pintura		3.505,9 €	
Preço Galvanização		5.286,6 €	
Preço Total		19.301,4 €	

Figura 6.12 - Características do poste mais económico em fabrico produzido com aço S 620

## 6.8.6 Aço S 690

As características geométricas que permitem obter o fabrico mais económico para o poste de transmissão realizado em aço S 690 são:

Altura:	46,5 m		
Ø Topo:	350 mm		
Ø Base:	1.700 mm		
Jorramento	29,03 mm/m		
Secção Transversal Circular (20 Lados)			
Esp. Mód. 1	11 mm	f (Hz)	,32 Hz
Esp. Mód. 2	10 mm	$\alpha$ cr,N	10,67
Esp. Mód. 3	9 mm	Segurança	1,0239
Esp. Mód. 4	7 mm	Peso	10,977 Ton
Esp. Mód. 5	5 (ov)	Área Pint.	149,74 m2
Nº Módulos Ø > 400mm		5	
Preço Aço		9.220,7 €	
Preço Quinagens		567,0 €	
Preços Soldas		426,0 €	
Preço Pintura		3.593,8 €	
Preço Galvanização		4.939,7 €	
Preço Total		18.747,1 €	

Figura 6.13 - Características do poste mais económico em fabrico produzido com aço S 690

## 6.8.7 RESUMO

No Quadro 6.4, na Figura 6.14 e na Figura 6.15 apresenta-se um resumo e comparação de preços entre as soluções mais económicas mencionadas.

Quadro 6.4 - Resumo de preços das soluções de dimensionamento mais económicas

Classe de aço	Preço de fabrico mínimo	%
S 355	24.417,9 €	+ 30,2
S 450	22.272,2 €	+ 18,8
S 500	20.617,3 €	+ 10,0
S 550	19.797,6 €	+ 5,6
S 620	19.301,0 €	+ 3,0
S 690	18.747,1 €	100

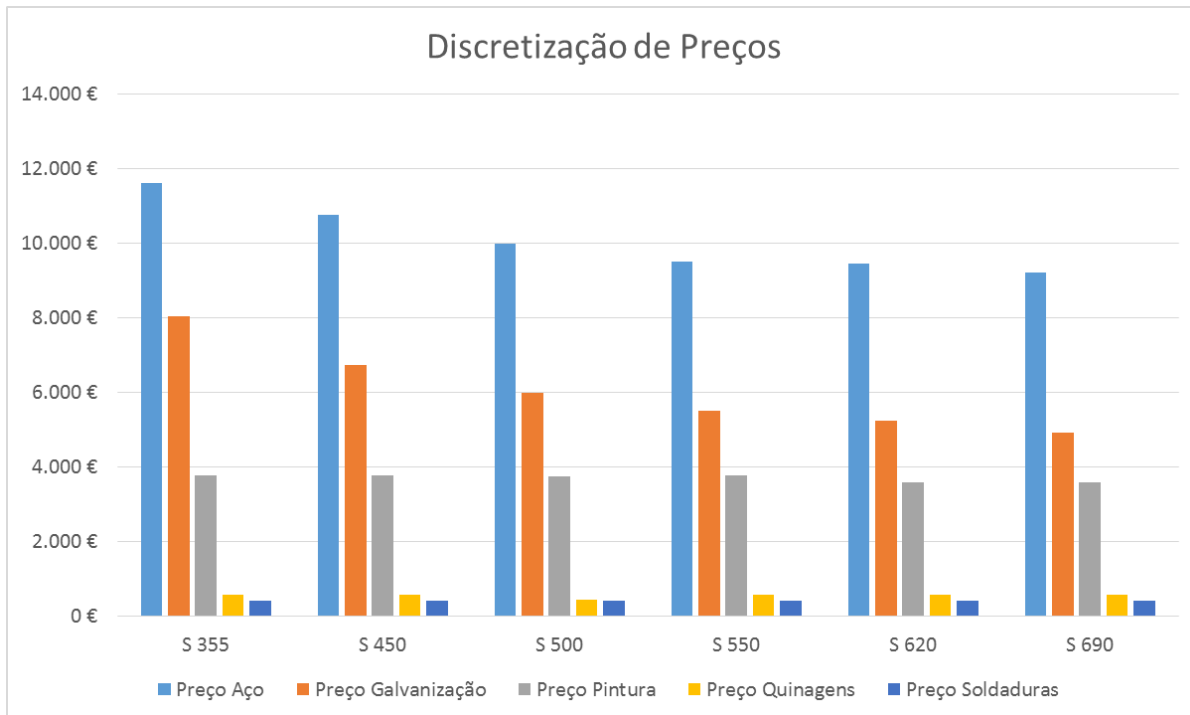


Figura 6.14 - Discretização dos preços dentro da solução mais económica para cada classe de aço

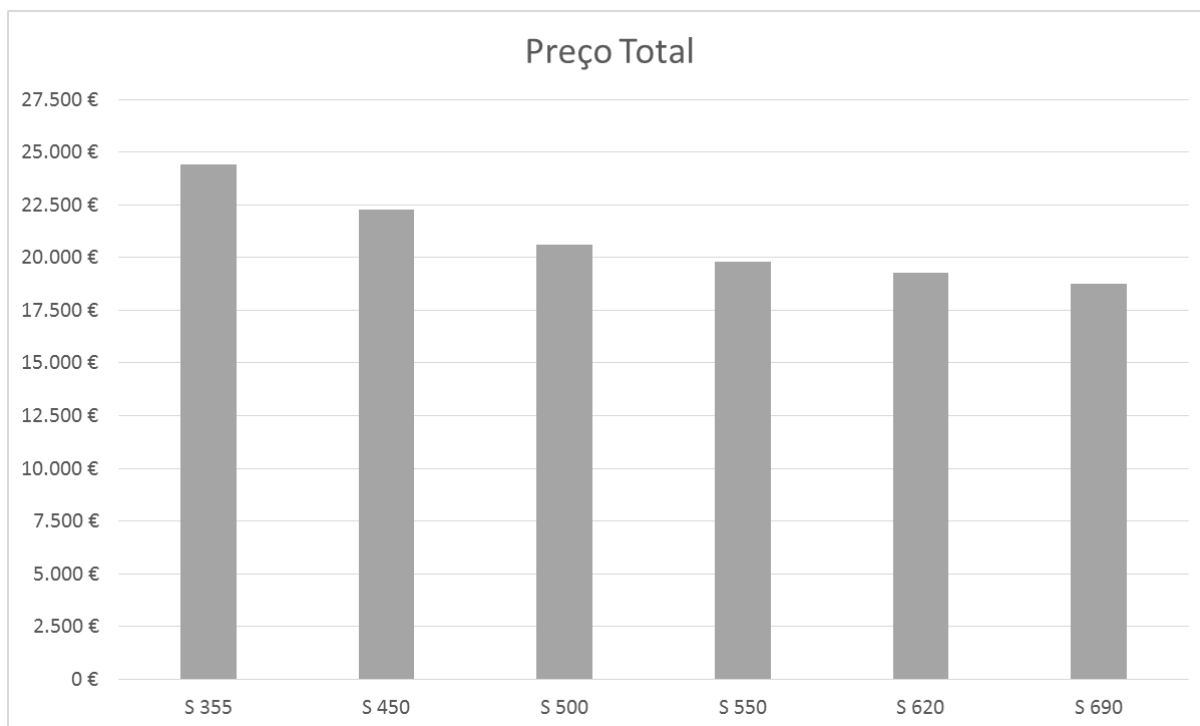


Figura 6.15 - Preço total da solução mais económica para cada classe de aço

# 7

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 7.1 CONCLUSÕES

A construção metálica de estruturas no Mundo começou a ganhar dimensão no século XIX e desde então a procura do aço, para material de construção, aumentou consideravelmente. Com a crescente evolução tecnológica ao longo das últimas décadas muitos novos materiais de construção foram desenvolvidos, nomeadamente os aços de resistências superiores e com características comportamentais de melhor qualidade. Isto despoletou ainda mais o seu interesse devido aos novos e mais abrangentes limites de projeto cujas soluções só os mesmos possibilitam alcançar.

O facto de possuírem resistências superiores permite obter componentes estruturais mais pequenos e esbeltos, com menor volume e peso mas sem comprometer a segurança. Daqui resulta um aumento do espectro das possibilidades de dimensionamento e arquitetura que anteriormente ainda não eram possíveis.

Com efeito, a procura constante de soluções estruturais menos dispendiosas nos mercados levou a que os suportes de linhas de transmissão, quer torres treliçadas, quer mastros tubulares, fossem sujeitos a novas análises estruturais com o intuito de se entender melhor a influência da utilização dos aços de alta resistência na sua economia e comportamento.

Deste modo, a presente dissertação incidiu na realização de uma análise comparativa de custos de fabrico para um caso particular de postes de transmissão, cujo fuste é produzido integralmente com diferentes classes de resistência de aço, desde aços macios até aços de alta resistência.

Com este intuito, escolheu-se para a análise um poste de transmissão piramidal com 46,5 metros de altura em que o fuste é composto por chapas metálicas tubulares que podem possuir uma secção octogonal, dodecagonal, hexadecagonal e icosagonal (admitida como circular) e que podem ser constituídas por várias classes de aço diferentes – S235, S275, S355, S450, S500, S550, S620 e S690. Devido a limitações de transporte o fuste foi dividido em 4 troços de 10 metros e 1 troço de 6,5 metros onde cada um pode ser formado por uma determinada espessura de chapa. Na zona superior do poste existem 2 braços para cabos de guarda e 6 braços para cabos condutores afastados por 10 metros.

Após a definição do tipo de poste de transmissão e por forma a concretizar o objetivo deste trabalho foi fundamental dimensionar vários casos, com características seccionais e mecânicas distintas, de modo a se obter a solução mais económica.

Todos estes projetos estruturais foram efetuados respeitando as diferentes Normas em vigor. As ações do vento sobre o poste de transmissão e sobre os cabos condutores foram calculadas com base no Euro-

código EN 1991-1-4 [90] e na Norma 50341-1 [101] enquanto o dimensionamento metálico foi calculado através dos Eurocódigos EN 1993-1-1 [30], EN 1993-1-5 [67], EN 1993-1-10 [71], EN 1993-1-12 [72], EN 1993-3-1 [73] e da Norma 50341-1 [101].

Como seria inviável qualquer tipo de cálculo manual, tendo em consideração as inúmeras variáveis e parâmetros associados a este trabalho, foi desenvolvida uma aplicação informática em *Visual Basic* que facilita o processo iterativo associado já que permite, de forma automática, o cálculo da ação do vento sobre a estrutura, dimensionamento e verificação de segurança individualmente para cada poste de transmissão analisado.

A utilização do método geral de verificação da encurvadura por flexão e encurvadura lateral demonstrou ser mais eficiente na medida em que permite um dimensionamento menos dispendioso e mais realista, principalmente por os postes de transmissão serem formados por secção transversal variável em altura. Não foi necessário simplificações nem modificações estruturais aquando a análise como caso se tivesse recorrido aos métodos tradicionais de verificação à encurvadura.

Tendo em conta algumas limitações de fabrico referidas pela empresa Metalgalva, introduziram-se na análise alguns critérios geométricos que condicionaram os limites dimensionamento. Após um processo iterativo de dimensionamento obteve-se uma população de 296 soluções estruturais possíveis para o poste de transmissão analisado. Tendo em conta as limitações impostas, as classes de aço S235 e S275 não conseguiram verificar a segurança em nenhum caso.

A procura da solução mais económica, a nível de produção, dentro da matriz de resultados obtidos adveio com a consideração de alguns preços médios, fornecidos pela Metalgalva, inerentes aos diferentes processos fundamentais para o fabrico de um fuste. Foram apresentados os preços do aço por tonelada conforme a sua classe, preço por quinagem, preço de soldaduras, preço da galvanização e preço da pintura final.

Com esta análise de custos os resultados obtidos foram bastante satisfatórios e indicam uma poupança monetária de 3,0%, 5,6%, 10,0%, 18,8% e 30,2% no custo de fabrico de um fuste executado em aço S690 em comparação com o aço S620, S550, S500, S450 e S355 respetivamente.

Os parâmetros que mais influenciam o preço de produção correspondem ao volume de aço utilizado e ao processo de galvanização, que depende diretamente do peso do componente estrutural.

Dentro da mesma análise e tendo em conta a matriz de soluções possíveis, observou-se que as soluções mais económicas advêm da utilização de diâmetros na base próximos do limite máximo permitido (1800mm) e diâmetros no topo de 350mm. A escolha de diâmetros maiores no topo começa a deixar de ser eficiente na medida em que a espessura do último módulo fica condicionada pela ovalização.

Concluiu-se assim que a escolha de aços de alta resistência permite obter preços mais reduzidos não só no fabrico dos postes de transmissão mas possuem também uma influência direta e benéfica no transporte e instalação devido à presença de peças menos volumosas e mais leves.

## 7.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Dentro do mesmo tema ainda existe uma vasta gama de análises que deverão ser realizadas para se poder comparar mais eficazmente o real custo e vantagens associadas a cada classe de resistência de aço.

A introdução de novos módulos de cálculo na aplicação informática desenvolvida permitiria facilitar este estudo nomeadamente através do cálculo automático das ações equivalentes dos cabos de transmissão, cálculo de ligações entre troços por encaixe, flange ou empalme, cálculo de fundações, cálculo da



frequência fundamental e coeficiente crítico do primeiro modo de encurvadura, cálculo de custos e processo total de otimização. Deste modo seria possível estudar e comparar e abranger a influência dos restantes parâmetros, associados ao projeto de postes de transmissão, que não foram considerados nesta dissertação.

Para uma análise ainda mais profunda e completa poder-se-ia avaliar as vantagens e desvantagens associadas à utilização de classes de aço diferentes para cada troço individual do fuste.



## BIBLIOGRAFIA

1. <http://www.theguardian.com/science/2013/aug/20/ancient-egyptian-beads-museum>. 28/02/2014.
2. <http://www.sott.net/article/262290-Ancient-Egyptians-crafted-jewelry-from-meteorites>. 28/02/2014.
3. <http://whc.unesco.org/en/list/371>. 28/02/2014.
4. <http://gb.fotolibra.com/images/previews/663535-the-ironbridge-shropshire-england.jpeg>. 28/02/2014.
5. Reis, M.N.d., *Processo de Produção e Uso do Alumínio na Construção Civil* 2006, Universidade de São Paulo: São Paulo.
6. <http://www.nydailynews.com/new-york/new-york-city-construction-workers-great-heights-gallery-1.1121866?pmSlide=1.1121855>. 28/02/2014.
7. <http://www.worldsteel.org/steel-by-topic/construction.html>. 28/02/2014.
8. [www.ine.pt](http://www.ine.pt). 28/02/2014.
9. *Statistical Bulletin for the Production in 2009*. 2010, European Convention for Constructional Steelwork: Istanbul.
10. Billingham, J., et al., *Review of the performance of high strength steels used offshore*. Health Saf. Exec, 2003. **105**.
11. Schröter, F., *Trends of using high-strength steel for heavy steel structures*. MA Giejowski, A. Kozowski, L. Iczka, J. Ziółko (Hrsg.): *Progress in Steel, Composite and Aluminium Structures*, S: p. 292-293.
12. <http://lh6.ggpht.com>. 02/03/2014.
13. <http://www.akersolutions.com/>. 02/03/2014.
14. *The Sony Center on Potsdamer Platz*. Dillinger Hutte GTS.
15. [www.structurae.de](http://www.structurae.de). 02/03/2014.
16. Kim, D.-H., S.-E. Lee, and J.-H. Kim. *High Strength Steel for Buildings*. in *CTBUH 2012*. 2012. Shanghai.
17. [http://www.cimm.com.br/portal/material\\_didatico/6340-acos-de-alta-resistencia-e-baixa-liga#.U70bNLHjwvI](http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6340-acos-de-alta-resistencia-e-baixa-liga#.U70bNLHjwvI). 04/03/2014.
18. Turzanski, T., J.C. Andre, and E. Karsten. *Steel OHTL Poles Characteristic and Advantages*. in *REN Conference*. 2013. Oslo: Valmont International
19. [http://www.centralsteelservice.com/transmission\\_pole\\_steel.htm](http://www.centralsteelservice.com/transmission_pole_steel.htm). 04/03/2014.
20. <http://spectrum.ieee.org>. 08/03/2014.
21. <http://www.steeltowerpole.com>. 08/03/2014.
22. <http://www.capx2020.com>. 08/03/2014.
23. Zampiron, I., *Avaliação das características e desempenho de estruturas para telecomunicações visando o projeto de novo modelo de torre autoportante*. 2008.
24. Sakiyama, *Torres e Postes Metálicos Transmitem e Informação*. Construção Metálica, 2005. **69**: p. 14-15.
25. Murteira, A.M.S., *Inspecção e manutenção de torres e postes de radiocomunicações*. 2010.
26. Holmes, J., *Along-wind response of lattice towers—II. Aerodynamic damping and deflections*. Engineering Structures, 1996. **18**(7): p. 483-488.
27. Almeida, J.A.S., *Análise comparativa entre normas europeias e norma norte-americana na caracterização da acção dinâmica do vento em torres de telecomunicações de grande altura*. 2013.
28. Paiva, F., J. Henriques, and R.C. Barros, *Review of Transmission Tower Testing Stations Around the World*. Procedia Engineering, 2013. **57**: p. 859-868.
29. Paiva, F., Henriques, J. Barros, R., *Bancos de Ensaio no Mundo para Torres de Transmissão de Energia Eléctrica*, in *II Congresso Luso-Africano de Construção Metálica Sustentável*. 2013: Maputo, Moçambique.

30. NP EN 1993-1-1: Eurocódigo 3: Projecto de estruturas de aço-Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios. 2010, Comité Europeu de Normalização (CEN): Bruxelas.
31. [www.mundoeducacao.com/quimica/propriedades-dos-metais.htm](http://www.mundoeducacao.com/quimica/propriedades-dos-metais.htm). 10/03/2014.
32. Ferrari, R.B., *Caracterização de liga metálica a base de alumínio-magnésio obtida por método convencional após tratamentos termomecânicos visando estruturas microcristalinas*. 2008, Universidade de São Paulo.
33. Padilha, A.F., *Materiais de engenharia*. 1997: Hemus.
34. [www.infopedia.pt/\\$liga-metalica](http://www.infopedia.pt/$liga-metalica). 10/03/2014.
35. Colaço, R., *Materiais de Construção, Guia de Utilização*. 2005. ISBN.
36. Chiaverini, V., *Aços e Ferros Fundidos, 7ª edição*, 1998. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Brasil.
37. <http://crystalhabits.com>. 11/03/2014.
38. <http://www.sv.vt.edu>. 11/03/2014.
39. Caram, R., *Estrutura e Propriedades dos Materiais: Estrutura Cristalina*. Faculdade de Engenharia Mecânica de Campinas.
40. <http://courses.washington.edu>. 11/03/2014.
41. [www.conceito.de/](http://www.conceito.de/). 12/03/2014.
42. [www.revisionworld.com](http://www.revisionworld.com). 12/03/2014.
43. <http://www.estruturas.ufpr.br/pagina-exemplo/graduacao/estruturas-metalicas/material/1-acos-estruturais/>. 13/03/2014.
44. <http://www.ebah.pt/content/ABAAABGh0AD/diagrama-ferro-carbono>. 13/03/2014.
45. Lourenço, J.P.F., *Estudo do Comportamento de Varões de Aço para Betão obtidos através do processo "Tempcore"*. 2012, Instituto Superior Técnico: Lisboa.
46. <http://metallurgyfordummies.com>. 13/03/2014.
47. [www.studyblue.com/notes/note/n/mse-final/deck/9090552](http://www.studyblue.com/notes/note/n/mse-final/deck/9090552). 13/03/2014.
48. <http://www.mspc.eng.br>. 13/03/2014.
49. <http://engineeringstudent.org.uk/phases-of-metals/>. 13/03/2014.
50. Filho, C.H.M.A., *Análise da Influência da Taxa de Resfriamento no Gradiente Microestrutural de Barras Laminadas a Quente Tratadas Termicamente*. 2004, Universidade Católica do Paraná: Curitiba.
51. Coutinho, J.d.S., *Apontamentos da Disciplina de Materiais de Construção I* 2011: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
52. <https://sites.google.com/site/epdprocessos/conformacao>. 14/03/2014.
53. <http://www.estevesgroup.com>. 14/03/2014.
54. SEABRA, A.V.d., *Metalurgia Geral Vol. II*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2002.
55. <http://forums.dfogknives.com>. 14/03/2014.
56. <http://3me.tudelft.nl>. 15/03/2014.
57. Soares, C.M., *Análise de bobinas de aço em serviços siderúrgicos*. 2012.
58. <http://carbonmineral.es.tl/COQUE-METALURGICO.htm>. 15/03/2014.
59. [www.bbc.co.uk](http://www.bbc.co.uk). 15/03/2014.
60. [http://www.infoacero.cl/catalogo/csh100\\_103.htm](http://www.infoacero.cl/catalogo/csh100_103.htm). 15/03/2014.
61. W.F., S., *Structure and Properties of Engineering Alloys*. 1993: Mc Graw Hill International Editions.
62. <http://ficadicanoticias.blogspot.pt/2013/08/producao-de-aco-liquido.html>. 15/03/2014.
63. <http://www.ganeshamsteel.com/steel-billets.htm>. 15/03/2014.
64. <http://www.crugroup.com/market-analysis/products/steelslabcostcurve>. 15/03/2014.
65. <http://www.gesmefze.com>. 15/03/2014.
66. <http://www.civil.ita.br/graduacao/disciplinas/lista.php?Which=EDI-46&Year=all>. 13/03/2014.
67. NP EN 1993-1-5: Eurocódigo 3: Projecto de estruturas de aço-Parte 1-5: Elementos em Placas. 2006, Comité Europeu de Normalização (CEN): Bruxelas.
68. NP EN 1993-1-6: Eurocódigo 3: Projecto de estruturas de aço-Parte 1-6: Resistência e Estabilidade de Cascas. Comité Europeu de Normalização (CEN): Bruxelas.

69. NP EN 1993-1-8: Eurocódigo 3: Projecto de estruturas de aço-Parte 1-8: Projeto de Ligações. Comité Europeu de Normalização: Bruxelas.
70. NP EN 1993-1-9: Eurocódigo 3: Projecto de estruturas de aço-Parte 1-9: Fadiga. Comité Europeu de Normalização (CEN): Bruxelas.
71. NP EN 1993-1-10: Eurocódigo 3: Projecto de estruturas de aço-Parte 1-10: Tenacidade dos materiais segundo a sua espessura. 2005, Comité Europeu de Normalização (CEN): Bruxelas.
72. NP EN 1993-1-12: Eurocódigo 3: Projecto de estruturas de aço-Parte 1-12: Regras adicionais para a extensão da EN 1993 até aços S700. 2007, Comité Europeu de Normalização (CEN): Bruxelas.
73. NP EN 1993-3-1: Eurocódigo 3: Projecto de estruturas de aço-Parte 3-1: Projeto de torres, mastros e chaminés - mastros e chaminés. 2006, Comité Europeu de Normalização (CEN): Bruxelas.
74. NP EN 1993-3-2: Eurocódigo 3: Projecto de estruturas de aço-Parte 3-2: Projeto de torres, mastros e chaminés - chaminés. 2006, Comité Europeu de Normalização (CEN): Bruxelas.
75. EN 1090: Execução de Estrutura em Aço - Requisitos Técnicos. Comité Europeu de Normalização: Bruxelas.
76. EN 10164: Produtos de Aço com Propriedades de Deformação Melhoradas Perpendiculares à Superfície do Produto - Condições Técnicas de Fornecimento. 1993, Comité Europeu de Normalização: Bruxelas.
77. NP EN 1990: Eurocódigo 0: Bases para o Projeto de Estruturas. 2009, Comité Europeu de Normalização (CEN): Bruxelas.
78. EN 1461: Especificações e Métodos de Teste para Revestimentos Galvanizados por Imersão a Quente sobre Artigos de Aço e Ferro Fabricados. 1999, Comité Europeu de Normalização (CEN): Bruxelas.
79. EN 12944: Proteção Anti-Corrosiva de Estruturas Metálicas por Sistemas de Pintura. Comité Europeu de Normalização: Bruxelas.
80. Loredou-Souza, A. and A. Davenport, *The influence of the design methodology in the response of transmission towers to wind loading*. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 2003. **91**(8): p. 995-1005.
81. Nunes, H.A.P., *Análise estrutural de uma torre tubular sob acção do vento*. 2012, INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA.
82. Holmes, J.D., *Wind loading of structures*. 2001: CRC Press.
83. <http://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/cap8/cap8-1.html>. 18/03/2014.
84. <http://to-campos.planetaclix.pt/nuvens1/ventos/ventos1.htm>. 18/03/2014.
85. Proclira, E., *Circulação geral da atmosfera, Circulação média à superfície e Circulação local*. 2007, Universidade de Évora: Évora.
86. Henriques, J.F.M., *Projecto de torres eólicas reticuladas de grande altura:(150M): modelação e análise comparativa com estruturas tubulares auto-suportadas*. 2013.
87. <http://pt.wikipedia.org/wiki/Brisa>. 18/03/2014.
88. [https://www.ipma.pt/export/sites/ipma/bin/images.site/enciclopedia/ventos\\_locais.gif](https://www.ipma.pt/export/sites/ipma/bin/images.site/enciclopedia/ventos_locais.gif). 18/03/2014.
89. <http://www.infoescola.com/geografia/moncoes-moncao>. 18/03/2014.
90. NP EN 1991-1-4: Eurocódigo 1: Ações em Estruturas - Parte 1-4: Ações do Vento. 2010, Comité Europeu de Normalização (CEN): Bruxelas.
91. Antunes, A.P.R.B.M., *Projecto de postes e mastros tubulares*. 2013.
92. Henriques, J.M., Barros, Rui C., *Design of a Lattice Wind Tower and a Comparison of the Structural Response With and Without a TMD*, in *14th International Conference on Civil Structural and Environmental Engineering Computing*. 2013: Cagliari-Sardinia-Italy.
93. Davenport, A., *How can we simplify and generalize wind loads?* Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1995. **54**: p. 657-669.
94. Barros, R.C., *Dimensionamento estrutural de mastros metálicos*. Revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería, 2002. **18**(3): p. 351-366.

95. Bastos, S.H., *Análise Estrutural do Efeito de Desprendimento de Vórtices (Vortex Shedding) e do Efeito da Fadiga, devido à Ação do Vento, no Dimensionamento de Torres Tubulares Metálicas de Secção Constante*. 2013, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Porto.
96. <http://www.stoneman.co.uk/flowinduced.html>. 21/03/2014.
97. Chu, S. and M. Zar, *Chimneys*. Structural Engineering Handbook, 1979.
98. Guimarães, M.P.G.M., *Postes de suporte de linhas aéreas*. 2012.
99. Dias, J., *Análise e dimensionamento de estruturas metálicas treliçadas de transporte de energia eléctrica de acordo com o EC3 (EN) ea EN50341-1*. Instituto Superior Técnico-Universidade Técnica de Lisboa, 2007.
100. Almeida, M. and R. Fuchs, *Projetos mecânicos das linhas aéreas de transmissão*. Editora Edgard Blücher Ltda, São Paulo, 1982.
101. *NP EN 50341: Linhas Eléctricas aéreas de tensão superior a 45kV - Parte 1: Especificações e requisitos gerais*. 2001, Comité Europeu de Normalização Eletrotécnica (CENELEC): Bruxelas.
102. *ISO 12494: Atmospheric icing of structures*. 2001, International Organization for Standardization.
103. Smith, B.W., *Communication structures*. 2007: Thomas Telford.
104. Manohar, S., *Tall chimneys: design and construction*. 1985: Tata McGraw-Hill Publishing Company.
105. *NP EN 1998-1: Eurocódigo 8: Projecto de estruturas para resistência aos sismos - Parte 1: Regras gerais, acções sísmicas e regras para edifícios*. 2004, Comité Europeu de Normalização (CEN): Bruxelas.
106. *NP EN 1998-6: Eurocódigo 8: Projecto de estruturas para resistência aos sismos - Parte 6: Torres, mastros e chaminés*. 2005, Comité Europeu de Normalização (CEN): Bruxelas.
107. Camotim, D., *Apontamentos Teóricos da Disciplina de Estruturas Metálicas e Mistas (Oarte de Metálicas)*. 2006.
108. Ceccon, J.L., *Análise dos efeitos de segunda ordem em pilares solicitados a flexão oblíqua composta*. 2008, Universidade de São Paulo.
109. Mendes, V.D.d.S., *Análise dos efeitos de segunda ordem em estruturas de betão armado com base nos métodos simplificados do EC2*. 2012.
110. <http://boaengenharia.blogspot.pt/>. 04/04/2014.
111. Calado, L., *Resistência de Materiais - Estabilidade do Equilíbrio*. 1994, Instituto Superior Técnico Lisboa.
112. <http://www.ebah.com.br/content/ABAAABXTsAK/relatorio-resistencia-dos-materiais-ensaio-flambagem>. 06/04/2014.
113. <http://i0.wp.com/ontario-wind-resistance.org/wp-content/uploads/2008/11/collapse.jpg>. 06/04/2014.
114. <http://www3.sympatico.ca/jiri.reznicek/CofeaW/Inertia/iManual83.htm>. 11/04/2014.
115. Gherzi, A., R. Landolfo, and F. Mazzolani, *Design of metallic cold-formed thin-walled members*. 2001: CRC Press.
116. Papp, F. and J. Szalai, *New approaches in Eurocode 3—efficient global structural design Part 0: An explanatory introduction*.
117. Szalai, J., *The “General Method” of EN 1993-1-1*, in *New Steel Construction*. 2011, The British Constructional Steelwork Association, The Steel Construction Institute, Tata Steel: London.
118. *NP EN 1991-1-7: Eurocódigo 1: Ações em Estruturas-Parte 1-7: Ações Acidentais*. 2006, Comité Europeu de Normalização (CEN): Bruxelas.
119. Simoes, R.A.D., *Manual de dimensionamento de estruturas metálicas: eurocódigo 3: projecto de estruturas de aço*. 2007: CMM-Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista.
120. Juvandes, L.F.P., *Apontamentos Teóricos de Resistência dos Materiais 2: Tensões tangenciais em flexão e torção*. 2002, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Porto.
121. Støttrup-Andersen, U. *Masts and towers*. in *Symposium of the International Association for Shell and Spatial Structures (50th. 2009. Valencia). Evolution and Trends in Design, Analysis and Construction of Shell and Spatial Structures: Proceedings*. 2009. Editorial Universitat Politècnica de València.

- 122. [www.fhwa.dot.gov/bridge/images/sign30.jpg](http://www.fhwa.dot.gov/bridge/images/sign30.jpg). 15/05/2014.
- 123. <http://metalogalva.pt/>. 2014.
- 124. <http://www.thefabricator.com>. 25/06/2014.
- 125. <http://sheetmetal.me/> 25/06/2014.
- 126. <http://www.galvaza.pt/pt/>. 05/07/2014.
- 127. <http://www.ruukki.com/>. 06/07/2014.





## **ANEXOS**

**ANEXO A1 – SOLUÇÕES DE DIMENSIONAMENTO**

**ANEXO A2 – APLICAÇÃO INFORMÁTICA DESENVOLVIDA**



## **ANEXO A1 – SOLUÇÕES DE DIMENSIONAMENTO**

Preço:

850 cr/Ton

Altura:

Ø Topo:

Ø Base:

Jarramento:

46,5 m

200 mm

1.800 mm

34,41 mm/m

8 Lados

Esp. Mod. 1

Esp. Mod. 2

Esp. Mod. 3

Esp. Mod. 4

Esp. Mod. 5

19 mm

20 mm

19 mm

17 mm

11 mm

f (Hz)

α cr,N

Segurança

Peso

Área Pint.

40 Hz

15,40

1.0015

20,499 Ton

142,36 m2

Nº Módulos Ø > 400mm

5

Preço Aço

Preço Quinagens

Preços Soldas

Preço Pintura

Preço Galvanização

Preço Total

13.324,4 €

227,0 €

426,0 €

3.416,6 €

9.224,6 €

26.618,5 €

12 Lados

Esp. Mod. 1

Esp. Mod. 2

Esp. Mod. 3

Esp. Mod. 4

Esp. Mod. 5

18 mm

18 mm

18 mm

18 mm

10 mm

f (Hz)

α cr,N

Segurança

Peso

Área Pint.

40 Hz

15,65

1.0014

19,418 Ton

144,42 m2

Nº Módulos Ø > 400mm

5

Preço Aço

Preço Quinagens

Preços Soldas

Preço Pintura

Preço Galvanização

Preço Total

12.621,7 €

340,0 €

426,0 €

3.466,1 €

8.738,1 €

25.591,9 €

16 Lados

Esp. Mod. 1

Esp. Mod. 2

Esp. Mod. 3

Esp. Mod. 4

Esp. Mod. 5

18 mm

17 mm

17 mm

18 mm

15 mm

f (Hz)

α cr,N

Segurança

Peso

Área Pint.

40 Hz

15,40

1.0001

18,861 Ton

145,15 m2

Nº Módulos Ø > 400mm

5

Preço Aço

Preço Quinagens

Preços Soldas

Preço Pintura

Preço Galvanização

Preço Total

12.359,7 €

453,0 €

426,0 €

3.483,6 €

8.487,5 €

25.109,7 €

Circular (20 Lados)

Esp. Mod. 1

Esp. Mod. 2

Esp. Mod. 3

Esp. Mod. 4

Esp. Mod. 5

17 mm

17 mm

17 mm

18 mm

10 mm

f (Hz)

α cr,N

Segurança

Peso

Área Pint.

40 Hz

15,80

1.0324

19,187 Ton

146,08 m2

Nº Módulos Ø > 400mm

5

Preço Aço

Preço Quinagens

Preços Soldas

Preço Pintura

Preço Galvanização

Preço Total

12.081,6 €

567,0 €

426,0 €

3.505,9 €

8.364,2 €

24.944,6 €

Altura:

Ø Topo:

Ø Base:

Jarramento:

46,5 m

350 mm

1.800 mm

31,18 mm/m

8 Lados

Esp. Mod. 1

Esp. Mod. 2

Esp. Mod. 3

Esp. Mod. 4

Esp. Mod. 5

19 mm

19 mm

17 mm

13 mm

6 mm

f (Hz)

α cr,N

Segurança

Peso

Área Pint.

42 Hz

18,33

1.0024

20,139 Ton

153,04 m2

Nº Módulos Ø > 400mm

5

Preço Aço

Preço Quinagens

Preços Soldas

Preço Pintura

Preço Galvanização

Preço Total

13.090,4 €

227,0 €

426,0 €

3.673,0 €

9.062,6 €

26.478,9 €

12 Lados

Esp. Mod. 1

Esp. Mod. 2

Esp. Mod. 3

Esp. Mod. 4

Esp. Mod. 5

18 mm

18 mm

16 mm

12 mm

6 mm

f (Hz)

α cr,N

Segurança

Peso

Área Pint.

43 Hz

18,71

1.0104

19,328 Ton

155,25 m2

Nº Módulos Ø > 400mm

5

Preço Aço

Preço Quinagens

Preços Soldas

Preço Pintura

Preço Galvanização

Preço Total

12.563,2 €

340,0 €

426,0 €

3.726,0 €

8.697,6 €

25.752,8 €

16 Lados

Esp. Mod. 1

Esp. Mod. 2

Esp. Mod. 3

Esp. Mod. 4

Esp. Mod. 5

17 mm

17 mm

15 mm

16 mm

6 mm

f (Hz)

α cr,N

Segurança

Peso

Área Pint.

42 Hz

18,44

1.0347

18,470 Ton

156,03 m2

Nº Módulos Ø > 400mm

5

Preço Aço

Preço Quinagens

Preços Soldas

Preço Pintura

Preço Galvanização

Preço Total

12.005,5 €

453,0 €

426,0 €

3.744,7 €

8.311,5 €

24.940,7 €

Seção Transversal Circular (20 Lados)

Esp. Mod. 1

Esp. Mod. 2

Esp. Mod. 3

Esp. Mod. 4

Esp. Mod. 5

16 mm

16 mm

13 mm

12 mm

6 mm

f (Hz)

α cr,N

Segurança

Peso

Área Pint.

42 Hz

18,57

1.0073

17,869 Ton

157,04 m2

Nº Módulos Ø > 400mm

5

Preço Aço

Preço Quinagens

Preços Soldas

Preço Pintura

Preço Galvanização

Preço Total

11.614,9 €

567,0 €

426,0 €

3.769,0 €

8.041,1 €

24.417,9 €

Altura:

Ø Topo:

Ø Base:

Jarramento:

46,5 m

500 mm

1.800 mm

27,96 mm/m

8 Lados

Esp. Mod. 1

Esp. Mod. 2

Esp. Mod. 3

Esp. Mod. 4

Esp. Mod. 5

20 mm

18 mm

15 mm

11 mm

6 (ov)

f (Hz)

α cr,N

Segurança

Peso

Área Pint.

45 Hz

20,96

1.0226

20,444 Ton

163,71 m2

Nº Módulos Ø > 400mm

5

Preço Aço

Preço Quinagens

Preços Soldas

Preço Pintura

Preço Galvanização

Preço Total

13.288,6 €

227,0 €

426,0 €

3.929,0 €

9.199,8 €

27.070,4 €

12 Lados

Esp. Mod. 1

Esp. Mod. 2

Esp. Mod. 3

Esp. Mod. 4

Esp. Mod. 5

16 mm

17 mm

14 mm

10 mm

6 (ov)

f (Hz)

α cr,N

Segurança

Peso

Área Pint.

45 Hz

21,08

1.0118

19,166 Ton

166,08 m2

Nº Módulos Ø > 400mm

5

Preço Aço

Preço Quinagens

Preços Soldas

Preço Pintura

Preço Galvanização

Preço Total

12.457,9 €

340,0 €

426,0 €

3.985,9 €

8.624,7 €

25.834,5 €

16 Lados

Esp. Mod. 1

Esp. Mod. 2

Esp. Mod. 3

Esp. Mod. 4

Esp. Mod. 5

16 mm

16 mm

13 mm

13 mm

6 (ov)

f (Hz)

α cr,N

Segurança

Peso

Área Pint.

44 Hz

20,35

1.0035

17,862 Ton

166,92 m2

Nº Módulos Ø > 400mm

5

Preço Aço

Preço Quinagens

Preços Soldas

Preço Pintura

Preço Galvanização

Preço Total

11.610,3 €

453,0 €

426,0 €

4.006,1 €

8.037,9 €

24.533,3 €

Circular (20 Lados)

Esp. Mod. 1

Esp. Mod. 2

Esp. Mod. 3

Esp. Mod. 4

Esp. Mod. 5

16 mm

16 mm

13 mm

9 mm

6 (ov)

f (Hz)

α cr,N

Segurança

Peso

Área Pint.

44 Hz

20,73

1.0012

17,785 Ton

168,00 m2

Nº Módulos Ø > 400mm

5

Preço Aço

Preço Quinagens

Preços Soldas

Preço Pintura

Preço Galvanização

Preço Total

11.560,3 €

567,0 €

426,0 €

4.032,0 €

8.003,3 €

24.588,5 €

Altura:

Ø Topo:

Ø Base:

Jarramento:

46,5 m

500 mm

1.800 mm

25,81 mm/m

8 Lados

Esp. Mod. 1

Esp. Mod. 2

Esp. Mod. 3

Esp. Mod. 4

Esp. Mod. 5

20 mm

19 mm

15 mm

11 mm

6 (ov)

f (Hz)

α cr,N

Segurança

Peso

Área Pint.

45 Hz

20,96

1.0226

20,444 Ton

163,71 m2

Nº Módulos Ø > 400mm

5

Preço Aço

Preço Quinagens

Preços Soldas

Preço Pintura

Preço Galvanização

Preço Total

13.288,6 €

227,0 €

426,0 €

3.929,0 €

9.199,8 €

27.070,4 €

12 Lados

Esp. Mod. 1

Esp. Mod. 2

Esp. Mod. 3

Esp. Mod. 4

Esp. Mod. 5

20 mm

19 mm

16 mm

11 mm

6 (ov)

f (Hz)

α cr,N

Segurança

Peso

Área Pint.

44 Hz

20,32

1.0198

19,333 Ton

158,86 m2

Nº Módulos Ø > 400mm

5

Preço Aço

Preço Quinagens

Preços Soldas

Preço Pintura

Preço Galvanização

Preço Total

13.216,5 €

340,0 €

426,0 €

3.812,6 €

9.149,9 €

26.944,9 €

16 Lados

Esp. Mod. 1

Esp. Mod. 2

Esp. Mod. 3

Esp. Mod. 4

Esp. Mod. 5

19 mm

18 mm

15 mm

10 mm

6 (ov)

f (Hz)

α cr,N

Segurança

Peso

Área Pint.

43 Hz

19,76

1.0149

19,307 Ton

159,66 m2

Nº Módulos Ø > 400mm

5

Preço Aço

Preço Quinagens

Preços Soldas

Preço Pintura

Preço Galvanização

Preço Total

12.549,6 €

453,0 €

426,0 €

3.831,8 €

8.688,2 €

25.948,5 €

Circular (20 Lados)

Esp. Mod. 1

Esp. Mod. 2

Esp. Mod. 3

Esp. Mod. 4

Esp. Mod. 5

18 mm

17 mm

15 mm

10 mm

6 (ov)

f (Hz)

α cr,N

Segurança

Peso

Área Pint.

43 Hz

19,87

1.0047

18,736 Ton

160,69 m2

Nº Módulos Ø > 400mm

5

Preço Aço

Preço Quinagens

Preços Soldas

Preço Pintura

Preço Galvanização

Preço Total

12.178,4 €

567,0 €

426,0 €

3.856,6 €

8.431,2 €

25.459,2 €

Altura:

Ø Topo:

Ø Base:

Jarramento:

46,5 m

500 mm

1.700 mm

23,66 mm/m

8 Lados

Esp. Mod. 1

Esp. Mod. 2

Esp. Mod. 3

Esp. Mod. 4

Esp. Mod. 5

20 mm

20 mm

17 mm

17 mm

11 mm

f (Hz)

α cr,N

Segurança

Peso

Área Pint.

45 Hz

20,96

1.0226

20,444 Ton

163,71 m2

Nº Módulos Ø > 400mm

5

Preço Aço

Preço Quinagens

Preços Soldas

Preço Pintura

Preço Galvanização

Preço Total

13.324,4 €

227,0 €

426,0 €

3.416,6 €

9.224,6 €

26.618,5 €

12 Lados

Esp. Mod. 1

Esp. Mod. 2

Esp. Mod. 3

Esp. Mod. 4

Esp. Mod. 5

18 mm

18 mm

16 mm

13 mm

10 mm

f (Hz)

α cr,N

Segurança

Peso

Área Pint.

45 Hz

21,08

1.0276

19,418 Ton

144,42 m2

Nº Módulos Ø > 400mm

5

Preço Aço

Preço Quinagens

Preços Soldas

Preço Pintura

Preço Galvanização

Preço Total

12.621,7 €

340,0 €

426,0 €

3.466,1 €

8.738,1 €

25.591,9 €

16 Lados

Esp. Mod. 1

Esp. Mod. 2

Esp. Mod. 3

Esp. Mod. 4

Esp. Mod. 5

20 mm

20 mm

19 mm

17 mm

17 mm

f (Hz)

α cr,N

Segurança

Peso

Área Pint.

39 Hz

14,81

1.0276

20,220 Ton

137,89 m2

Nº Módulos Ø > 400mm

5

Preço Aço

Preço Quinagens

Preços Soldas

Preço Pintura

Preço Galvanização

Preço Total

13.143,0 €

453,0 €

426,0 €

3.309,4 €

9.099,0 €

26.430,4 €

Circular (20 Lados)

Esp. Mod. 1

Esp. Mod. 2

Esp. Mod. 3

Esp. Mod. 4

Esp. Mod. 5

19 mm

19 mm

19 mm

17 mm

11 mm

f (Hz)

α cr,N

Segurança

Peso

Área Pint.

39 Hz

15,04

1.0056

19,691 Ton

138,78 m2

Nº Módulos Ø > 400mm

5

Preço Aço

Preço Quinagens

Preços Soldas

Preço Pintura

Preço Galvanização

Preço Total

12.799,2 €

567,0 €

426,0 €

3.330,7 €

8.861,0 €

25.983,8 €

Altura:

Ø Topo:

Ø Base:

Jarramento:

46,5 m

350 mm

1.700 mm

24,73 mm/m

8 Lados

Esp. Mod. 1

Esp. Mod. 2

Esp. Mod. 3

Esp. Mod. 4

Esp. Mod. 5

19 mm

19 mm

17 mm

13 mm

6 mm

f (Hz)

α cr,N

Segurança

Peso

Área Pint.

42 Hz

18,33

1.0024

20,139 Ton

153,04 m2

Nº Módulos Ø > 400mm

5

Preço Aço

Preço Quinagens

Preços Soldas

Preço Pintura

Preço Galvanização

Preço Total

13.323,7 €

227,0 €

426,0 €

3.673,0 €

9.224,1 €

26.866,5 €

12 Lados

Esp. Mod. 1

Esp. Mod. 2

Esp. Mod. 3

Esp. Mod. 4

Esp. Mod. 5

20 mm

20 mm

18 mm

14 mm

6 mm

f (Hz)

α cr,N

Segurança

Peso

Área Pint.

42 Hz

18,01

1.0278

19,243 Ton

148,78 m2

Nº Módulos Ø > 400mm

5

Preço Aço

Preço Quinagens

Preços Soldas

Preço Pintura

Preço Galvanização

Preço Total

13.323,7 €

340,0 €

426,0 €

3.552,7 €

9.224,1 €

26.866,5 €

16 Lados

Esp. Mod. 1

Esp. Mod. 2

Esp. Mod. 3

Esp. Mod. 4

Esp. Mod. 5

19 mm

18 mm

17 mm

13 mm

6 mm

f (Hz)

α cr,N

Segurança

Peso

Área Pint.

41 Hz

17,39

1.0020

19,243 Ton

148,78 m2

Nº Módulos Ø > 400mm

5

Preço Aço

Preço Quinagens

Preços Soldas

Preço Pintura

Preço Galvanização

Preço Total

12.508,0 €

453,0 €

426,0 €

3.570,7 €

8.659,4 €

25.617,0 €

Circular (20 Lados)

Esp. Mod. 1

Esp. Mod. 2

Esp. Mod. 3

Esp. Mod. 4

Esp. Mod. 5

18 mm

18 mm

16 mm

13 mm

6 mm

f (Hz)

α cr,N

Segurança

Peso

Área Pint.

41 Hz

17,51

1.0039

18,759 Ton

149,74 m2

Nº Módulos Ø > 400mm

5

Preço Aço

Preço Quinagens

Preços Soldas

Preço Pintura

Preço Galvanização

Preço Total

12.193,4 €

567,0 €

426,0 €

3.593,8 €

8.441,6 €

25.221,7 €

Altura:

Ø Topo:

Ø Base:

Jarramento:

46,5 m

500 mm

1.800 mm

23,66 mm/m

8 Lados

Esp. Mod. 1

Esp. Mod. 2

Esp. Mod. 3

Esp. Mod. 4

Esp. Mod. 5

20 mm

20 mm

17 mm

17 mm

11 mm

f (Hz)

α cr,N

Segurança

Peso

Área Pint.

45 Hz

20,96

1.0226

20,444 Ton

163,71 m2

Nº Módulos Ø > 400mm

5

Preço Aço

Preço Quinagens

Preços Soldas

Preço Pintura

Preço Galvanização

Preço Total

13.324,4 €

227,0 €

426,0 €

3.416,6 €

9.224,6 €

26.618,5 €

12 Lados

Esp. Mod. 1

Esp. Mod. 2

Esp. Mod. 3

Esp. Mod. 4

Esp. Mod. 5

20 mm

20 mm

16 mm

13 mm

6 (ov)

f (Hz)

α cr,N

Segurança

Peso

Área Pint.

45 Hz

21,08

1.0276

19,418 Ton

144,42 m2

Nº Módulos Ø > 400mm

5

Preço Aço

Preço Quinagens

Preços Soldas

Preço Pintura

Preço Galvanização

Preço Total

13.323,7 €

340,0 €

426,0 €

3.552,7 €

9.224,1 €

26.866,5 €

16 Lados

Esp. Mod. 1

Esp. Mod. 2

Esp. Mod. 3

Esp. Mod. 4

Esp. Mod. 5

19 mm

18 mm

15 mm

10 mm

6 (ov)

f (Hz)

α cr,N

Segurança

Peso

Área Pint.

41 Hz

17,39

1.0020

19,243 Ton

148,78 m2

Nº Módulos Ø > 400mm

5

Preço Aço

Preço Quinagens

Preços Soldas

Preço Pintura

Preço Galvanização

Preço Total

12.508,0 €

453,0 €

426,0 €

3.570,7 €

8.659,4 €

25.617,0 €

Circular (20 Lados)

Esp. Mod. 1

Esp. Mod. 2

Esp. Mod. 3

Esp. Mod. 4

Esp. Mod. 5

18 mm

18 mm

16 mm

13 mm

6 mm

f (Hz)

α cr,N

Segurança

Peso

Área Pint.

41 Hz

17,51

1.0039

18,759 Ton

149,74 m2

Nº Módulos Ø > 400mm

5

Preço Aço

Preço Quinagens

Preços Soldas

Preço Pintura

Preço Galvanização

Preço Total

12.193,4 €

567,0 €

426,0 €

3.593,8 €

8.441,6 €

25.221,7 €

Altura:

Ø Topo:

Ø Base:

Jarramento:

46,5 m

500 mm

1.400 mm

19,35 mm/m

8 Lados

Esp. Mod. 1

Esp. Mod. 2

Esp. Mod. 3

Esp. Mod. 4

Esp. Mod. 5

20 mm

20 mm

17 mm

17 mm

11 mm

f (Hz)

α cr,N

Segurança

Peso

Área Pint.

45 Hz

20,96

1.0226

20,444 Ton

163,71 m2

Nº Módulos Ø > 400mm

5

Preço Aço

Preço Quinagens

Preços Soldas

Preço Pintura

Preço Galvanização

Preço Total

13.324,4 €

227,0 €

426,0 €

3.416,6 €

9.224,6 €

26.618,5 €

12 Lados

Esp. Mod. 1

Esp. Mod. 2

Esp. Mod. 3

Esp. Mod. 4

Esp. Mod. 5

20 mm

20 mm

16 mm

13 mm

6 (ov)

f (Hz)

α cr,N

Segurança

Peso

Área Pint.

45 Hz

21,08

1.0276

19,418 Ton

144,42 m2

Nº Módulos Ø > 400mm

5

Preço Aço

Preço Quinagens

Preços Soldas

Preço Pintura

Preço Galvanização

Preço Total

13.323,7 €

340,0 €

426,0 €

3.552,7 €

9.224,1 €

26.866,5 €

16 Lados

Esp. Mod. 1

Esp. Mod. 2

Esp. Mod. 3

Esp. Mod. 4

Esp. Mod. 5

19 mm

18 mm

15 mm

10 mm

6 (ov)

f (Hz)

α cr,N

Segurança

Peso

Área Pint.

41 Hz

17,39

1.0020

19,243 Ton

148,78 m2

Nº Módulos Ø > 400mm

5

Preço Aço

Preço Quinagens

Preços Soldas

Preço Pintura

Preço Galvanização

Preço: 720 €/Ton									
Altura: 46,5 m		Ø Topo: 200 mm		Ø Base: 1.800 mm		Jorramento 34,41 mm/m			
8 Lados		Esp. Mod. 1	17 mm	f (Hz)	37 Hz	Esp. Mod. 2	17 mm	α cr/N	13,17
		Esp. Mod. 3	15 mm	Segurança	1,0054	Esp. Mod. 4	14 mm	Peso	17,483 Ton
		Esp. Mod. 5	9 mm	Área Pint.	142,36 m2	Nº Módulos Ø > 400mm		5	
		Preço Aço		12.587,8 €		Preço Quinagens		227,0 €	
		Preços Soldas		426,0 €		Preço Pintura		3.416,6 €	
		Preço Galvanização		7.867,4 €		Preço Total		24.524,8 €	
12 Lados		Esp. Mod. 1	15 mm	f (Hz)	37 Hz	Esp. Mod. 2	15 mm	α cr/N	13,37
		Esp. Mod. 3	15 mm	Segurança	1,0183	Esp. Mod. 4	13 mm	Peso	16,211 Ton
		Esp. Mod. 5	9 mm	Área Pint.	144,42 m2	Nº Módulos Ø > 400mm		5	
		Preço Aço		11.671,9 €		Preço Quinagens		340,0 €	
		Preços Soldas		426,0 €		Preço Pintura		3.466,1 €	
		Preço Galvanização		7.295,0 €		Preço Total		23.199,0 €	
16 Lados		Esp. Mod. 1	14 mm	f (Hz)	36 Hz	Esp. Mod. 2	14 mm	α cr/N	13,15
		Esp. Mod. 3	14 mm	Segurança	1,0109	Esp. Mod. 4	13 mm	Peso	15,325 Ton
		Esp. Mod. 5	8 mm	Área Pint.	145,15 m2	Nº Módulos Ø > 400mm		5	
		Preço Aço		11.034,0 €		Preço Quinagens		453,0 €	
		Preços Soldas		426,0 €		Preço Pintura		3.483,6 €	
		Preço Galvanização		6.896,3 €		Preço Total		22.292,9 €	
Circular (20 Lados)		Esp. Mod. 1	14 mm	f (Hz)	37 Hz	Esp. Mod. 2	14 mm	α cr/N	13,58
		Esp. Mod. 3	14 mm	Segurança	1,0154	Esp. Mod. 4	13 mm	Peso	15,428 Ton
		Esp. Mod. 5	8 mm	Área Pint.	146,08 m2	Nº Módulos Ø > 400mm		5	
		Preço Aço		11.108,2 €		Preço Quinagens		567,0 €	
		Preços Soldas		426,0 €		Preço Pintura		3.505,9 €	
		Preço Galvanização		6.942,6 €		Preço Total		22.549,7 €	
Circular (20 Lados)		Esp. Mod. 1	16 mm	f (Hz)	36 Hz	Esp. Mod. 2	16 mm	α cr/N	12,99
		Esp. Mod. 3	16 mm	Segurança	1,0159	Esp. Mod. 4	14 mm	Peso	16,466 Ton
		Esp. Mod. 5	9 mm	Área Pint.	137,89 m2	Nº Módulos Ø > 400mm		5	
		Preço Aço		11.935,4 €		Preço Quinagens		567,0 €	
		Preços Soldas		426,0 €		Preço Pintura		3.330,7 €	
		Preço Galvanização		7.459,7 €		Preço Total		23.718,8 €	
Circular (20 Lados)		Esp. Mod. 1	18 mm	f (Hz)	35 Hz	Esp. Mod. 2	18 mm	α cr/N	11,99
		Esp. Mod. 3	18 mm	Segurança	1,0073	Esp. Mod. 4	16 mm	Peso	17,510 Ton
		Esp. Mod. 5	10 mm	Área Pint.	129,98 m2	Nº Módulos Ø > 400mm		4	
		Preço Aço		12.607,2 €		Preço Quinagens		340,0 €	
		Preços Soldas		800,0 €		Preço Pintura		3.119,5 €	
		Preço Galvanização		7.879,5 €		Preço Total		24.874,8 €	
Circular (20 Lados)		Esp. Mod. 1	18 mm	f (Hz)	35 Hz	Esp. Mod. 2	18 mm	α cr/N	11,99
		Esp. Mod. 3	18 mm	Segurança	1,0016	Esp. Mod. 4	15 mm	Peso	17,305 Ton
		Esp. Mod. 5	10 mm	Área Pint.	131,48 m2	Nº Módulos Ø > 400mm		4	
		Preço Aço		12.459,6 €		Preço Quinagens		567,0 €	
		Preços Soldas		800,0 €		Preço Pintura		3.155,5 €	
		Preço Galvanização		7.787,3 €		Preço Total		24.769,4 €	
Circular (20 Lados)		Esp. Mod. 1	18 mm	f (Hz)	35 Hz	Esp. Mod. 2	18 mm	α cr/N	11,99
		Esp. Mod. 3	18 mm	Segurança	1,0016	Esp. Mod. 4	15 mm	Peso	17,305 Ton
		Esp. Mod. 5	10 mm	Área Pint.	131,48 m2	Nº Módulos Ø > 400mm		4	
		Preço Aço		12.459,6 €		Preço Quinagens		567,0 €	
		Preços Soldas		800,0 €		Preço Pintura		3.155,5 €	
		Preço Galvanização		7.787,3 €		Preço Total		24.769,4 €	
Circular (20 Lados)		Esp. Mod. 1	18 mm	f (Hz)	35 Hz	Esp. Mod. 2	18 mm	α cr/N	11,99
		Esp. Mod. 3	18 mm	Segurança	1,0016	Esp. Mod. 4	15 mm	Peso	17,305 Ton
		Esp. Mod. 5	10 mm	Área Pint.	131,48 m2	Nº Módulos Ø > 400mm		4	
		Preço Aço		12.459,6 €		Preço Quinagens		567,0 €	
		Preços Soldas		800,0 €		Preço Pintura		3.155,5 €	
		Preço Galvanização		7.787,3 €		Preço Total		24.769,4 €	
Circular (20 Lados)		Esp. Mod. 1	18 mm	f (Hz)	35 Hz	Esp. Mod. 2	18 mm	α cr/N	11,99
		Esp. Mod. 3	18 mm	Segurança	1,0016	Esp. Mod. 4	15 mm	Peso	17,305 Ton
		Esp. Mod. 5	10 mm	Área Pint.	131,48 m2	Nº Módulos Ø > 400mm		4	
		Preço Aço		12.459,6 €		Preço Quinagens		567,0 €	
		Preços Soldas		800,0 €		Preço Pintura		3.155,5 €	
		Preço Galvanização		7.787,3 €		Preço Total		24.769,4 €	
Circular (20 Lados)		Esp. Mod. 1	18 mm	f (Hz)	35 Hz	Esp. Mod. 2	18 mm	α cr/N	11,99
		Esp. Mod. 3	18 mm	Segurança	1,0016	Esp. Mod. 4	15 mm	Peso	17,305 Ton
		Esp. Mod. 5	10 mm	Área Pint.	131,48 m2	Nº Módulos Ø > 400mm		4	
		Preço Aço		12.459,6 €		Preço Quinagens		567,0 €	
		Preços Soldas		800,0 €		Preço Pintura		3.155,5 €	
		Preço Galvanização		7.787,3 €		Preço Total		24.769,4 €	
Circular (20 Lados)		Esp. Mod. 1	18 mm	f (Hz)	35 Hz	Esp. Mod. 2	18 mm	α cr/N	11,99
		Esp. Mod. 3	18 mm	Segurança	1,0016	Esp. Mod. 4	15 mm	Peso	17,305 Ton
		Esp. Mod. 5	10 mm	Área Pint.	131,48 m2	Nº Módulos Ø > 400mm		4	
		Preço Aço		12.459,6 €		Preço Quinagens		567,0 €	
		Preços Soldas		800,0 €		Preço Pintura		3.155,5 €	
		Preço Galvanização		7.787,3 €		Preço Total		24.769,4 €	
Circular (20 Lados)		Esp. Mod. 1	18 mm	f (Hz)	35 Hz	Esp. Mod. 2	18 mm	α cr/N	11,99
		Esp. Mod. 3	18 mm	Segurança	1,0016	Esp. Mod. 4	15 mm	Peso	17,305 Ton
		Esp. Mod. 5	10 mm	Área Pint.	131,48 m2	Nº Módulos Ø > 400mm		4	
		Preço Aço		12.459,6 €		Preço Quinagens		567,0 €	
		Preços Soldas		800,0 €		Preço Pintura		3.155,5 €	
		Preço Galvanização		7.787,3 €		Preço Total		24.769,4 €	
Circular (20 Lados)		Esp. Mod. 1	18 mm	f (Hz)	35 Hz	Esp. Mod. 2	18 mm	α cr/N	11,99
		Esp. Mod. 3	18 mm	Segurança	1,0016	Esp. Mod. 4	15 mm	Peso	17,305 Ton
		Esp. Mod. 5	10 mm	Área Pint.	131,48 m2	Nº Módulos Ø > 400mm		4	
		Preço Aço		12.459,6 €		Preço Quinagens		567,0 €	
		Preços Soldas		800,0 €		Preço Pintura		3.155,5 €	
		Preço Galvanização		7.787,3 €		Preço Total		24.769,4 €	
Circular (20 Lados)		Esp. Mod. 1	18 mm	f (Hz)	35 Hz	Esp. Mod. 2	18 mm	α cr/N	11,99
		Esp. Mod. 3	18 mm	Segurança	1,0016	Esp. Mod. 4	15 mm	Peso	17,305 Ton
		Esp. Mod. 5	10 mm	Área Pint.	131,48 m2	Nº Módulos Ø > 400mm		4	
		Preço Aço		12.459,6 €		Preço Quinagens		567,0 €	
		Preços Soldas		800,0 €		Preço Pintura		3.155,5 €	
		Preço Galvanização		7.787,3 €		Preço Total		24.769,4 €	
Circular (20 Lados)		Esp. Mod. 1	18 mm	f (Hz)	35 Hz	Esp. Mod. 2	18 mm	α cr/N	11,99
		Esp. Mod. 3	18 mm	Segurança	1,0016	Esp. Mod. 4	15 mm	Peso	17,305 Ton
		Esp. Mod. 5	10 mm	Área Pint.	131,48 m2	Nº Módulos Ø > 400mm		4	
		Preço Aço		12.459,6 €		Preço Quinagens		567,0 €	
		Preços Soldas		800,0 €		Preço Pintura		3.155,5 €	
		Preço Galvanização		7.787,3 €		Preço Total		24.769,4 €	
Circular (20 Lados)		Esp. Mod. 1	18 mm	f (Hz)	35 Hz	Esp. Mod. 2	18 mm	α cr/N	11,99
		Esp. Mod. 3	18 mm	Segurança	1,0016	Esp. Mod. 4	15 mm	Peso	17,305 Ton
		Esp. Mod. 5	10 mm	Área Pint.	131,48 m2	Nº Módulos Ø > 400mm		4	
		Preço Aço		12.459,6 €		Preço Quinagens		567,0 €	
		Preços Soldas		800,0 €		Preço Pintura		3.155,5 €	
		Preço Galvanização		7.787,3 €		Preço Total		24.769,4 €	
Circular (20 Lados)		Esp. Mod. 1	18 mm	f (Hz)	35 Hz	Esp. Mod. 2	18 mm	α cr/N	11,99
		Esp. Mod. 3	18 mm	Segurança	1,0016	Esp. Mod. 4	15 mm	Peso	17,305 Ton
		Esp. Mod. 5	10 mm	Área Pint.	131,48 m2	Nº Módulos Ø > 400mm		4	
		Preço Aço		12.459,6 €		Preço Quinagens		567,0 €	
		Preços Soldas		800,0 €		Preço Pintura		3.155,5 €	
		Preço Galvanização		7.787,3 €		Preço Total		24.769,4 €	
Circular (20 Lados)		Esp. Mod. 1	18 mm	f (Hz)	35 Hz	Esp. Mod. 2	18 mm	α cr/N	11,99
		Esp. Mod. 3	18 mm	Segurança	1,0016	Esp. Mod. 4	15 mm	Peso	17,305 Ton
		Esp. Mod. 5	10 mm	Área Pint.	131,48 m2	Nº Módulos Ø > 400mm		4	
		Preço Aço		12.459,6 €		Preço Quinagens		567,0 €	
		Preços Soldas		800,0 €		Preço Pintura		3.155,5 €	
		Preço Galvanização		7.787,3 €		Preço Total		24.769,4 €	
Circular (20 Lados)		Esp. Mod. 1	18 mm	f (Hz)	35 Hz	Esp. Mod. 2	18 mm	α cr/N	11,99
		Esp. Mod. 3	18 mm	Segurança	1,0016	Esp. Mod. 4	15 mm	Peso	17,305 Ton
		Esp. Mod. 5	10 mm	Área Pint.	131,48 m2	Nº Módulos Ø > 400mm		4	
		Preço Aço		12.459,6 €		Preço Quinagens		567,0 €	
		Preços Soldas		800,0 €		Preço Pintura		3.155,5 €	
		Preço Galvanização		7.787,3 €		Preço Total		24.769,4 €	
Circular (20 Lados)		Esp. Mod. 1	18 mm	f (Hz)	35 Hz	Esp. Mod. 2	18 mm	α cr/N	11,99
		Esp. Mod. 3	18 mm	Segurança	1,0016	Esp. Mod. 4	15 mm	Peso	17,305 Ton
		Esp. Mod. 5	10 mm	Área Pint.	131,48 m2	Nº Módulos Ø > 400mm		4	
		Preço Aço		12.459,6 €		Preço Quinagens		567,0 €	
		Preços Soldas		800,0 €		Preço Pintura		3.155,5 €	
		Preço Galvanização		7.787,3 €		Preço Total		24.769,4 €	
Circular (20 Lados)		Esp. Mod. 1	18 mm	f (Hz)	35 Hz	Esp. Mod. 2	18 mm	α cr/N	11,99
		Esp. Mod. 3	18 mm	Segurança	1,0016	Esp. Mod. 4	15 mm	Peso	17,305 Ton
		Esp. Mod. 5	10 mm	Área Pint.	131,48 m2	Nº Módulos Ø > 400mm		4	
		Preço Aço		12.459,6 €		Preço Quinagens		567,0 €	
		Preços Soldas		800,0 €		Preço Pintura		3.155,5 €	
		Preço Galvanização		7.787,3 €		Preço Total		24.769,4 €	
Circular (20 Lados)		Esp. Mod. 1	18 mm	f (Hz)	35 Hz	Esp. Mod. 2	18 mm	α cr/N	11,99
		Esp. Mod. 3	18 mm	Segurança	1,0016	Esp. Mod. 4	15 mm	Peso	17,305 Ton
		Esp. Mod. 5	10 mm	Área Pint.	131,48 m2	Nº Módulos Ø > 400mm		4	
		Preço Aço		12.459,6 €		Preço Quinagens		567,0 €	
		Preços Soldas		800,0 €		Preço Pintura		3.155,5 €	
		Preço Galvanização		7.787,3 €		Preço Total		24.769,4 €	
Circular (20 Lados)		Esp. Mod. 1	18 mm	f (Hz)	35 Hz	Esp. Mod. 2	18 mm	α cr/N	11,99
		Esp. Mod. 3	18 mm	Segurança	1,0016	Esp. Mod. 4	15 mm	Peso	17,305 Ton
		Esp. Mod. 5	10 mm	Área Pint.	131,48 m2	Nº Módulos Ø > 400mm		4	
		Preço Aço		12.459,6 €		Preço Quinagens		567,0 €	
		Preços Soldas		800,0 €		Preço Pintura		3.155,5 €	
		Preço Galvanização		7.787,3 €		Preço Total		24.769,4 €	
Circular (20 Lados)		Esp. Mod. 1	18 mm	f (Hz)	35 Hz	Esp. Mod. 2	18 mm	α cr/N	11,99
		Esp. Mod. 3	18 mm	Segurança	1,0016	Esp. Mod. 4	15 mm	Peso	17,305 Ton
		Esp. Mod. 5	10 mm	Área Pint.	131,48 m2	Nº Módulos Ø > 400mm		4	
		Preço Aço		12.459,6 €		Preço Quinagens		567,0 €	
		Preços Soldas		800,0 €		Preço Pintura		3.155,5 €	
		Preço Galvanização		7.787,3 €		Preço Total		24.769,4 €	
Circular (20 Lados)		Esp. Mod. 1	18 mm	f (Hz)	35 Hz	Esp. Mod. 2	18 mm	α cr/N	11,99
		Esp. Mod. 3	18 mm	Segurança	1,0016	Esp. Mod. 4	15 mm	Peso	17,305 Ton
		Esp. Mod. 5	10 mm	Área Pint.	131,48 m2	Nº Módulos Ø > 400mm		4	
		Preço Aço		12.459,6 €		Preço Quinagens		567,0 €	
		Preços Soldas		800,0 €		Preço Pintura		3.155,5 €	
		Preço Galvanização		7.787,3 €		Preço Total		24.769,4 €	
Circular (20 Lados)		Esp. Mod. 1	18 mm	f (Hz)	35 Hz	Esp. Mod. 2	18 mm	α cr/N	11,99
		Esp. Mod. 3	18 mm	Segurança	1,0016	Esp. Mod. 4	15 mm	Peso	17,305 Ton
		Esp. Mod. 5	10 mm	Área Pint.	131,48 m2	Nº Módulos Ø > 400mm		4	
		Preço Aço		12.459,6 €		Preço Quinagens		567,0 €	
		Preços Soldas		800,0 €		Preço Pintura		3.155,5 €	
		Preço Galvanização		7.787,3 €		Preço Total			





Preço: 775 €/Ton				S 550			
Altura: 46,5 m Ø Topo: 200 mm Ø Base: 1.800 mm Jorramento: 34,41 mm/m				Altura: 46,5 m Ø Topo: 200 mm Ø Base: 1.700 mm Jorramento: 30,11 mm/m			
8 Lados				8 Lados			
Esp. Mod. 1 16 mm f (Hz) 35 Hz Esp. Mod. 2 15 mm α cr,N 11,43 Esp. Mod. 3 13 mm Segurança 1.0134 Esp. Mod. 4 11 mm Peso 15.571 Ton Esp. Mod. 5 7 mm Área Pint. 142,36 m2 Nº Módulos Ø > 400mm 5 Preço Aço 12.067,5 € Preço Quinagens 227,0 € Preços Soldas 426,0 € Preço Pintura 3.416,6 € Preço Galvanização 7.007,0 € Preço Total 23.144,1 €				Esp. Mod. 1 17 mm f (Hz) 34 Hz Esp. Mod. 2 16 mm α cr,N 10,81 Esp. Mod. 3 15 mm Segurança 1.0038 Esp. Mod. 4 12 mm Peso 15.999 Ton Esp. Mod. 5 8 mm Área Pint. 133,24 m2 Nº Módulos Ø > 400mm 5 Preço Aço 12.399,2 € Preço Quinagens 227,0 € Preços Soldas 426,0 € Preço Pintura 3.245,8 € Preço Galvanização 7.199,6 € Preço Total 23.497,5 €			
Esp. Mod. 1 13 mm f (Hz) 34 Hz Esp. Mod. 2 12 mm α cr,N 11,48 Esp. Mod. 3 12 mm Segurança 1.0012 Esp. Mod. 4 11 mm Peso 13.783 Ton Esp. Mod. 5 7 mm Área Pint. 144,42 m2 Nº Módulos Ø > 400mm 5 Preço Aço 10.681,8 € Preço Quinagens 340,0 € Preços Soldas 426,0 € Preço Pintura 3.466,1 € Preço Galvanização 6.202,4 € Preço Total 21.116,3 €				Esp. Mod. 1 14 mm f (Hz) 33 Hz Esp. Mod. 2 14 mm α cr,N 10,68 Esp. Mod. 3 13 mm Segurança 1.0017 Esp. Mod. 4 12 mm Peso 14.124 Ton Esp. Mod. 5 8 mm Área Pint. 137,20 m2 Nº Módulos Ø > 400mm 5 Preço Aço 10.946,1 € Preço Quinagens 340,0 € Preços Soldas 426,0 € Preço Pintura 3.292,8 € Preço Galvanização 6.355,8 € Preço Total 21.360,7 €			
Esp. Mod. 1 12 mm f (Hz) 34 Hz Esp. Mod. 2 12 mm α cr,N 11,19 Esp. Mod. 3 12 mm Segurança 1.0076 Esp. Mod. 4 10 mm Peso 13.008 Ton Esp. Mod. 5 7 mm Área Pint. 145,15 m2 Nº Módulos Ø > 400mm 5 Preço Aço 10.081,2 € Preço Quinagens 453,0 € Preços Soldas 426,0 € Preço Pintura 3.483,6 € Preço Galvanização 5.853,6 € Preço Total 20.297,4 €				Esp. Mod. 1 13 mm f (Hz) 33 Hz Esp. Mod. 2 13 mm α cr,N 10,68 Esp. Mod. 3 13 mm Segurança 1.0076 Esp. Mod. 4 12 mm Peso 13.530 Ton Esp. Mod. 5 8 mm Área Pint. 137,89 m2 Nº Módulos Ø > 400mm 5 Preço Aço 10.485,8 € Preço Quinagens 453,0 € Preços Soldas 426,0 € Preço Pintura 3.309,4 € Preço Galvanização 6.088,5 € Preço Total 20.762,6 €			
Esp. Mod. 1 12 mm f (Hz) 34 Hz Esp. Mod. 2 12 mm α cr,N 11,29 Esp. Mod. 3 11 mm Segurança 1.0057 Esp. Mod. 4 10 mm Peso 12.871 Ton Esp. Mod. 5 7 mm Área Pint. 146,08 m2 Nº Módulos Ø > 400mm 5 Preço Aço 9.975,0 € Preço Quinagens 567,0 € Preços Soldas 426,0 € Preço Pintura 3.505,9 € Preço Galvanização 5.792,0 € Preço Total 20.265,9 €				Esp. Mod. 1 13 mm f (Hz) 33 Hz Esp. Mod. 2 13 mm α cr,N 10,77 Esp. Mod. 3 13 mm Segurança 1.0062 Esp. Mod. 4 11 mm Peso 13.443 Ton Esp. Mod. 5 7 mm Área Pint. 138,78 m2 Nº Módulos Ø > 400mm 5 Preço Aço 10.418,3 € Preço Quinagens 567,0 € Preços Soldas 426,0 € Preço Pintura 3.330,7 € Preço Galvanização 6.049,4 € Preço Total 20.791,4 €			
Altura: 46,5 m Ø Topo: 350 mm Ø Base: 1.800 mm Jorramento: 31,18 mm/m				Altura: 46,5 m Ø Topo: 350 mm Ø Base: 1.700 mm Jorramento: 29,03 mm/m			
8 Lados				8 Lados			
Esp. Mod. 1 16 mm f (Hz) 38 Hz Esp. Mod. 2 15 mm α cr,N 14,63 Esp. Mod. 3 12 mm Segurança 1.0028 Esp. Mod. 4 10 mm Peso 15.986 Ton Esp. Mod. 5 5 mm Área Pint. 153,04 m2 Nº Módulos Ø > 400mm 5 Preço Aço 12.389,2 € Preço Quinagens 227,0 € Preços Soldas 426,0 € Preço Pintura 3.673,0 € Preço Galvanização 7.193,7 € Preço Total 23.908,8 €				Esp. Mod. 1 18 mm f (Hz) 34 Hz Esp. Mod. 2 17 mm α cr,N 12,33 Esp. Mod. 3 14 mm Segurança 1.0172 Esp. Mod. 4 11 mm Peso 16.311 Ton Esp. Mod. 5 6 mm Área Pint. 138,80 m2 Nº Módulos Ø > 400mm 5 Preço Aço 12.641,0 € Preço Quinagens 227,0 € Preços Soldas 426,0 € Preço Pintura 3.331,2 € Preço Galvanização 7.340,0 € Preço Total 23.506,4 €			
Esp. Mod. 1 13 mm f (Hz) 37 Hz Esp. Mod. 2 13 mm α cr,N 13,73 Esp. Mod. 3 11 mm Segurança 1.0057 Esp. Mod. 4 8 mm Peso 13.813 Ton Esp. Mod. 5 5 mm Área Pint. 155,25 m2 Nº Módulos Ø > 400mm 5 Preço Aço 10.705,1 € Preço Quinagens 340,0 € Preços Soldas 426,0 € Preço Pintura 3.726,0 € Preço Galvanização 6.215,9 € Preço Total 21.412,9 €				Esp. Mod. 1 15 mm f (Hz) 34 Hz Esp. Mod. 2 15 mm α cr,N 10,35 Esp. Mod. 3 14 mm Segurança 1.0074 Esp. Mod. 4 13 mm Peso 14.479 Ton Esp. Mod. 5 8 mm Área Pint. 131,48 m2 Nº Módulos Ø > 400mm 5 Preço Aço 11.221,2 € Preço Quinagens 567,0 € Preços Soldas 800,0 € Preço Pintura 3.135,1 € Preço Galvanização 6.561,5 € Preço Total 22.249,8 €			
Altura: 46,5 m Ø Topo: 500 mm Ø Base: 1.800 mm Jorramento: 27,96 mm/m				Altura: 46,5 m Ø Topo: 500 mm Ø Base: 1.600 mm Jorramento: 26,88 mm/m			
8 Lados				8 Lados			
Esp. Mod. 1 16 mm f (Hz) 40 Hz Esp. Mod. 2 14 mm α cr,N 17,24 Esp. Mod. 3 12 mm Segurança 1.0171 Esp. Mod. 4 9 mm Peso 16.414 Ton Esp. Mod. 5 6 (ov) Área Pint. 163,71 m2 Nº Módulos Ø > 400mm 5 Preço Aço 12.720,9 € Preço Quinagens 227,0 € Preços Soldas 426,0 € Preço Pintura 3.929,9 € Preço Galvanização 7.386,3 € Preço Total 24.689,2 €				Esp. Mod. 1 17 mm f (Hz) 36 Hz Esp. Mod. 2 16 mm α cr,N 14,22 Esp. Mod. 3 13 mm Segurança 1.0062 Esp. Mod. 4 10 mm Peso 16.577 Ton Esp. Mod. 5 6 (ov) Área Pint. 149,48 m2 Nº Módulos Ø > 400mm 5 Preço Aço 12.713,9 € Preço Quinagens 227,0 € Preços Soldas 426,0 € Preço Pintura 3.587,5 € Preço Galvanização 7.382,3 € Preço Total 24.336,6 €			
Esp. Mod. 1 12 mm f (Hz) 39 Hz Esp. Mod. 2 12 mm α cr,N 15,95 Esp. Mod. 3 10 mm Segurança 1.0013 Esp. Mod. 4 8 mm Peso 14.067 Ton Esp. Mod. 5 6 (ov) Área Pint. 166,08 m2 Nº Módulos Ø > 400mm 5 Preço Aço 10.901,9 € Preço Quinagens 340,0 € Preços Soldas 426,0 € Preço Pintura 3.985,9 € Preço Galvanização 6.330,2 € Preço Total 21.984,0 €				Esp. Mod. 1 15 mm f (Hz) 35 Hz Esp. Mod. 2 14 mm α cr,N 13,68 Esp. Mod. 3 12 mm Segurança 1.0107 Esp. Mod. 4 8 mm Peso 14.560 Ton Esp. Mod. 5 6 (ov) Área Pint. 151,64 m2 Nº Módulos Ø > 400mm 5 Preço Aço 11.132,1 € Preço Quinagens 340,0 € Preços Soldas 426,0 € Preço Pintura 3.639,4 € Preço Galvanização 6.552,0 € Preço Total 22.241,4 €			
Altura: 46,5 m Ø Topo: 500 mm Ø Base: 1.800 mm Jorramento: 27,96 mm/m				Altura: 46,5 m Ø Topo: 500 mm Ø Base: 1.600 mm Jorramento: 23,66 mm/m			
8 Lados				8 Lados			
Esp. Mod. 1 16 mm f (Hz) 34 Hz Esp. Mod. 2 16 mm α cr,N 11,39 Esp. Mod. 3 16 mm Segurança 1.0167 Esp. Mod. 4 12 mm Peso 16.558 Ton Esp. Mod. 5 6 mm Área Pint. 131,68 m2 Nº Módulos Ø > 400mm 5 Preço Aço 12.832,5 € Preço Quinagens 227,0 € Preços Soldas 426,0 € Preço Pintura 3.160,3 € Preço Galvanização 7.451,1 € Preço Total 24.096,9 €				Esp. Mod. 1 19 mm f (Hz) 31 Hz Esp. Mod. 2 18 mm α cr,N 9,54 Esp. Mod. 3 17 mm Segurança 1.0014 Esp. Mod. 4 14 mm Peso 15.454 Ton Esp. Mod. 5 9 mm Área Pint. 123,78 m2 Nº Módulos Ø > 400mm 5 Preço Aço 12.457,4 € Preço Quinagens 340,0 € Preços Soldas 800,0 € Preço Pintura 2.946,2 € Preço Galvanização 7.233,3 € Preço Total 23.776,9 €			
Esp. Mod. 1 12 mm f (Hz) 39 Hz Esp. Mod. 2 12 mm α cr,N 15,95 Esp. Mod. 3 10 mm Segurança 1.0013 Esp. Mod. 4 8 mm Peso 14.067 Ton Esp. Mod. 5 6 (ov) Área Pint. 166,08 m2 Nº Módulos Ø > 400mm 5 Preço Aço 10.901,9 € Preço Quinagens 340,0 € Preços Soldas 426,0 € Preço Pintura 3.985,9 € Preço Galvanização 6.330,2 € Preço Total 21.984,0 €				Esp. Mod. 1 17 mm f (Hz) 31 Hz Esp. Mod. 2 18 mm α cr,N 9,63 Esp. Mod. 3 17 mm Segurança 1.0143 Esp. Mod. 4 15 mm Peso 16.074 Ton Esp. Mod. 5 9 mm Área Pint. 122,76 m2 Nº Módulos Ø > 400mm 5 Preço Aço 12.457,4 € Preço Quinagens 340,0 € Preços Soldas 800,0 € Preço Pintura 2.946,2 € Preço Galvanização 7.233,3 € Preço Total 23.776,9 €			
Altura: 46,5 m Ø Topo: 500 mm Ø Base: 1.800 mm Jorramento: 27,96 mm/m				Altura: 46,5 m Ø Topo: 500 mm Ø Base: 1.500 mm Jorramento: 21,51 mm/m			
8 Lados				8 Lados			
Esp. Mod. 1 16 mm f (Hz) 34 Hz Esp. Mod. 2 16 mm α cr,N 11,39 Esp. Mod. 3 16 mm Segurança 1.0167 Esp. Mod. 4 12 mm Peso 16.558 Ton Esp. Mod. 5 6 mm Área Pint. 131,68 m2 Nº Módulos Ø > 400mm 5 Preço Aço 12.832,5 € Preço Quinagens 227,0 € Preços Soldas 426,0 € Preço Pintura 3.160,3 € Preço Galvanização 7.451,1 € Preço Total 24.096,9 €				Esp. Mod. 1 19 mm f (Hz) 31 Hz Esp. Mod. 2 19 mm α cr,N 9,38 Esp. Mod. 3 18 mm Segurança 1.0053 Esp. Mod. 4 16 mm Peso 16.700 Ton Esp. Mod. 5 9 mm Área Pint. 121,00 m2 Nº Módulos Ø > 400mm 5 Preço Aço 12.942,5 € Preço Quinagens 227,0 € Preços Soldas 800,0 € Preço Pintura 2.904,0 € Preço Galvanização 7.515,0 € Preço Total 24.388,5 €			
Esp. Mod. 1 12 mm f (Hz) 39 Hz Esp. Mod. 2 12 mm α cr,N 15,95 Esp. Mod. 3 10 mm Segurança 1.0013 Esp. Mod. 4 8 mm Peso 14.067 Ton Esp. Mod. 5 6 (ov) Área Pint. 166,08 m2 Nº Módulos Ø > 400mm 5 Preço Aço 10.901,9 € Preço Quinagens 340,0 € Preços Soldas 426,0 € Preço Pintura 3.985,9 € Preço Galvanização 6.330,2 € Preço Total 21.984,0 €				Esp. Mod. 1 17 mm f (Hz) 31 Hz Esp. Mod. 2 18 mm α cr,N 9,63 Esp. Mod. 3 17 mm Segurança 1.0143 Esp. Mod. 4 15 mm Peso 16.074 Ton Esp. Mod. 5 9 mm Área Pint. 122,76 m2 Nº Módulos Ø > 400mm 5 Preço Aço 12.457,4 € Preço Quinagens 340,0 € Preços Soldas 800,0 € Preço Pintura 2.946,2 € Preço Galvanização 7.233,3 € Preço Total 23.776,9 €			
Altura: 46,5 m Ø Topo: 500 mm Ø Base: 1.800 mm Jorramento: 27,96 mm/m				Altura: 46,5 m Ø Topo: 500 mm Ø Base: 1.400 mm Jorramento: 19,35 mm/m			
8 Lados				8 Lados			
Esp. Mod. 1 16 mm f (Hz) 34 Hz Esp. Mod. 2 16 mm α cr,N 11,39 Esp. Mod. 3 16 mm Segurança 1.0167 Esp. Mod. 4 12 mm Peso 16.558 Ton Esp. Mod. 5 6 mm Área Pint. 131,68 m2 Nº Módulos Ø > 400mm 5 Preço Aço 12.832,5 € Preço Quinagens 227,0 € Preços Soldas 426,0 € Preço Pintura 3.160,3 € Preço Galvanização 7.451,1 € Preço Total 24.096,9 €				Esp. Mod. 1 19 mm f (Hz) 31 Hz Esp. Mod. 2 19 mm α cr,N 9,38 Esp. Mod. 3 18 mm Segurança 1.0053 Esp. Mod. 4 16 mm Peso 16.700 Ton Esp. Mod. 5 9 mm Área Pint. 121,00 m2 Nº Módulos Ø > 400mm 5 Preço Aço 12.942,5 € Preço Quinagens 227,0 € Preços Soldas 800,0 € Preço Pintura 2.904,0 € Preço Galvanização 7.515,0 € Preço Total 24.388,5 €			
Esp. Mod. 1 12 mm f (Hz) 39 Hz Esp. Mod. 2 12 mm α cr,N 15,95 Esp. Mod. 3 10 mm Segurança 1.0013 Esp. Mod. 4 8 mm Peso 14.067 Ton Esp. Mod. 5 6 (ov) Área Pint. 166,08 m2 Nº Módulos Ø > 400mm 5 Preço Aço 10.901,9 € Preço Quinagens 340,0 € Preços Soldas 426,0 € Preço Pintura 3.985,9 € Preço Galvanização 6.330,2 € Preço Total 21.984,0 €				Esp. Mod. 1 17 mm f (Hz) 31 Hz Esp. Mod. 2 18 mm α cr,N 9,63 Esp. Mod. 3 17 mm Segurança 1.0143 Esp. Mod. 4 15 mm Peso 16.074 Ton Esp. Mod. 5 9 mm Área Pint. 122,76 m2 Nº Módulos Ø > 400mm 5 Preço Aço 12.457,4 € Preço Quinagens 340,0 € Preços Soldas 800,0 € Preço Pintura 2.946,2 € Preço Galvanização 7.233,3 € Preço Total 23.776,9 €			
Altura: 46,5 m Ø Topo: 500 mm Ø Base: 1.800 mm Jorramento: 27,96 mm/m				Altura: 46,5 m Ø Topo: 500 mm Ø Base: 1.300 mm Jorramento: 17,20 mm/m			
8 Lados				8 Lados			
Esp. Mod. 1 16 mm f (Hz) 34 Hz Esp. Mod. 2 16 mm α cr,N 11,39 Esp. Mod. 3 16 mm Segurança 1.0167 Esp. Mod. 4 12 mm Peso 16.558 Ton Esp. Mod. 5 6 mm Área Pint. 131,68 m2 Nº Módulos Ø > 400mm 5 Preço Aço 12.832,5 € Preço Quinagens 227,0 € Preços Soldas 426,0 € Preço Pintura 3.160,3 € Preço Galvanização 7.451,1 € Preço Total 24.096,9 €				Esp. Mod. 1 19 mm f (Hz) 31 Hz Esp. Mod. 2 19 mm α cr,N 9,38 Esp. Mod. 3 18 mm Segurança 1.0053 Esp. Mod. 4 16 mm Peso 16.700 Ton Esp. Mod. 5 9 mm Área Pint. 121,00 m2 Nº Módulos Ø > 400mm 5 Preço Aço 12.942,5 € Preço Quinagens 227,0 € Preços Soldas 800,0 € Preço Pintura 2.904,0 € Preço Galvanização 7.515,0 € Preço Total 24.388,5 €			
Esp. Mod. 1 12 mm f (Hz) 39 Hz Esp. Mod. 2 12 mm α cr,N 15,95 Esp. Mod. 3 10 mm Segurança 1.0013 Esp. Mod. 4 8 mm Peso 14.067 Ton Esp. Mod. 5 6 (ov) Área Pint. 166,08 m2 Nº Módulos Ø > 400mm 5 Preço Aço 10.901,9 € Preço Quinagens 340,0 € Preços Soldas 426,0 € Preço Pintura 3.985,9 € Preço Galvanização 6.330,2 € Preço Total 21.984,0 €				Esp. Mod. 1 17 mm f (Hz) 31 Hz Esp. Mod. 2 18 mm α cr,N 9,63 Esp. Mod. 3 17 mm Segurança 1.0143 Esp. Mod. 4 15 mm Peso 16.074 Ton Esp. Mod. 5 9 mm Área Pint. 122,76 m2 Nº Módulos Ø > 400mm 5 Preço Aço 12.457,4 € Preço Quinagens 340,0 € Preços Soldas 800,0 € Preço Pintura 2.946,2 € Preço Galvanização 7.233,3 € Preço Total 23.776,9 €			
Altura: 46,5 m Ø Topo: 500 mm Ø Base: 1.800 mm Jorramento: 27,96 mm/m				Altura: 46,5 m Ø Topo: 500 mm Ø Base: 1.200 mm Jorramento: 15,05 mm/m			
8 Lados				8 Lados			
Esp. Mod. 1 16 mm f (Hz) 34 Hz Esp. Mod. 2 16 mm α cr,N 11,39 Esp. Mod. 3 16 mm Segurança 1.0167 Esp. Mod. 4 12 mm Peso 16.558 Ton Esp. Mod. 5 6 mm Área Pint. 131,68 m2 Nº Módulos Ø > 400mm 5 Preço Aço 12.832,5 € Preço Quinagens 227,0 € Preços Soldas 426,0 € Preço Pintura 3.160,3 € Preço Galvanização 7.451,1 € Preço Total 24.096,9 €				Esp. Mod. 1 19 mm f (Hz) 31 Hz Esp. Mod. 2 19 mm α cr,N 9,38 Esp. Mod. 3 18 mm Segurança 1.0053 Esp. Mod. 4 16 mm Peso 16.700 Ton Esp. Mod. 5 9 mm Área Pint. 121,00 m2 Nº Módulos Ø > 400mm 5 Preço Aço 12.942,5 € Preço Quinagens 227,0 € Preços Soldas 800,0 € Preço Pintura 2.904,0 € Preço Galvanização 7.515,0 € Preço Total 24.388,5 €			
Esp. Mod. 1 12 mm f (Hz) 39 Hz Esp. Mod. 2 12 mm α cr,N 15,95 Esp. Mod. 3 10 mm Segurança 1.0013 Esp. Mod. 4 8 mm Peso 14.067 Ton Esp. Mod. 5 6 (ov) Área Pint. 166,08 m2 Nº Módulos Ø > 400mm 5 Preço Aço 10.901,9 € Preço Quinagens 340,0 € Preços Soldas 426,0 € Preço Pintura 3.985,9 € Preço Galvanização 6.330,2 € Preço Total 21.984,0 €				Esp. Mod. 1 17 mm f (Hz) 31 Hz Esp. Mod. 2 18 mm α cr,N 9,63 Esp. Mod. 3 17 mm Segurança 1.0143 Esp. Mod. 4 15 mm Peso 16.074 Ton Esp. Mod. 5 9 mm Área Pint. 122,76 m2 Nº Módulos Ø > 400mm 5 Preço Aço 12.457,4 € Preço Quinagens 340,0 € Preços Soldas 800,0 € Preço Pintura 2.946,2 € Preço Galvanização 7.233,3 € Preço Total 23.776,9 €			
Altura: 46,5 m Ø Topo: 500 mm Ø Base: 1.800 mm Jorramento: 27,96 mm/m				Altura: 46,5 m Ø Topo: 500 mm Ø Base: 1.100 mm Jorramento: 12,70 mm/m			
8 Lados				8 Lados			
Esp. Mod. 1 16 mm f (Hz) 34 Hz Esp. Mod. 2 16 mm α cr,N 11,39 Esp. Mod. 3 16 mm Segurança 1.0167 Esp. Mod. 4 12 mm Peso 16.558 Ton Esp. Mod. 5 6 mm Área Pint. 131,68 m2 Nº Módulos Ø > 400mm 5 Preço Aço 12.832,5 € Preço Quinagens 227,0 € Preços Soldas 426,0 € Preço Pintura 3.160,3 € Preço Galvanização 7.451,1 € Preço Total 24.096,9 €				Esp. Mod. 1 19 mm f (Hz) 31 Hz Esp. Mod. 2 19 mm α cr,N 9,38 Esp. Mod. 3 18 mm Segurança 1.0053 Esp. Mod. 4 16 mm Peso 16.700 Ton Esp. Mod. 5 9 mm Área Pint. 121,00 m2 Nº Módulos Ø > 400mm 5 Preço Aço 12.942,5 € Preço Quinagens 227,0 € Preços Soldas 800,0 € Preço Pintura 2.904,0 € Preço Galvanização 7.515,0 € Preço Total 24.388,5 €			
Esp. Mod. 1 12 mm f (Hz) 39 Hz Esp. Mod. 2 12 mm α cr,N 15,95 Esp. Mod. 3 10 mm Segurança 1.0013 Esp. Mod. 4 8 mm Peso 14.067 Ton Esp. Mod. 5 6 (ov) Área Pint. 166,08 m2 Nº Módulos Ø > 400mm 5 Preço Aço 10.901,9 € Preço Quinagens 340,0 € Preços Soldas 426,0 € Preço Pintura 3.985,9 € Preço Galvanização 6.330,2 € Preço Total 21.984,0 €				Esp. Mod. 1 17 mm f (Hz) 31 Hz Esp. Mod. 2 18 mm α cr,N 9,63 Esp. Mod. 3 17 mm Segurança 1.0143 Esp. Mod. 4 15 mm Peso 16.074 Ton Esp. Mod. 5 9 mm Área Pint. 122,76 m2 Nº Módulos Ø > 400mm 5 Preço Aço 12.457,4 € Preço Quinagens 340,0 € Preços Soldas 800,0 € Preço Pintura 2.946,2 € Preço Galvanização 7.233,3 € Preço Total 23.776,9 €			
Altura: 46,5 m Ø Topo: 500 mm Ø Base: 1.800 mm Jorramento: 27,96 mm/m				Altura: 46,5 m Ø Topo: 500 mm Ø Base: 1.000 mm Jorramento: 9,55 mm/m			
8 Lados				8 Lados			
Esp. Mod. 1 16 mm f (Hz) 34 Hz Esp. Mod. 2 16 mm α cr,N 11,39 Esp. Mod. 3 16 mm Segurança 1.0167 Esp. Mod. 4 12 mm Peso 16.558 Ton Esp. Mod. 5 6 mm Área Pint. 131,68 m2 Nº Módulos Ø > 400mm 5 Preço Aço 12.832,5 € Preço Quinagens 227,0 € Preços Soldas 426,0 € Preço Pintura 3.160,3 € Preço Galvanização 7.451,1 € Preço Total 24.096,9 €				Esp. Mod. 1 19 mm f (Hz) 31 Hz Esp. Mod. 2 19 mm α cr,N 9,38 Esp. Mod. 3 18 mm Segurança 1.0053 Esp. Mod. 4 16 mm Peso 16.700 Ton Esp. Mod. 5 9 mm Área Pint. 121,00 m2 Nº Módulos Ø > 400mm 5 Preço Aço 12.942,5 € Preço Quinagens 227,0 € Preços Soldas 800,0 € Preço Pintura 2.904,0 € Preço Galvanização 7.515,0 € Preço Total 24.388,5 €			
Esp. Mod. 1 12 mm f (Hz) 39 Hz Esp. Mod. 2 12 mm α cr,N 15,95 Esp. Mod. 3 10 mm Segurança 1.0013 Esp. Mod. 4 8 mm Peso 14.067 Ton Esp. Mod. 5 6 (ov) Área Pint. 166,08 m2 Nº Módulos Ø > 400mm 5 Preço Aço 10.901,9 € Preço Quinagens 340,0 € Preços Soldas 426,0 € Preço Pintura 3.985,9 € Preço Galvanização 6.330,2 € Preço Total 21.984,0 €				Esp. Mod. 1 17 mm f (Hz) 31 Hz Esp. Mod. 2 18 mm α cr,N 9,63 Esp. Mod. 3 17 mm Segurança 1.0143 Esp. Mod. 4 15 mm Peso 16.074 Ton Esp. Mod. 5 9 mm Área Pint. 122,76 m2 Nº Módulos Ø > 400mm 5 Preço Aço 12.457,4 € Preço Quinagens 340,0 € Preços Soldas 800,0 € Preço Pintura 2.946,2 € Preço Galvanização 7.233,3 € Preço Total 23.776,9 €			
Altura: 46,5 m Ø Topo: 500 mm Ø Base: 1.800 mm Jorramento: 27,96 mm/m				Altura: 46,5 m Ø Topo: 500 mm Ø Base: 900 mm Jorramento: 6,33 mm/m			
8 Lados				8 Lados			
Esp. Mod. 1 16 mm f (Hz) 34 Hz Esp. Mod. 2 16 mm α cr,N 11,39 Esp. Mod. 3 16 mm Segurança 1.0167 Esp. Mod. 4 12 mm Peso 16.558 Ton Esp. Mod. 5 6 mm Área Pint. 131,68 m2 Nº Módulos Ø > 400mm 5 Preço Aço 12.832,5 € Preço Quinagens 227,0 € Preços Soldas 426,0 € Preço Pintura 3.160,3 € Preço Galvanização 7.451,1 € Preço Total 24.096,9 €				Esp. Mod. 1 19 mm f (Hz) 31 Hz Esp. Mod. 2 19 mm α cr,N 9,38 Esp. Mod. 3 18 mm Segurança 1.0053 Esp. Mod. 4 16 mm Peso 16.700 Ton Esp. Mod. 5 9 mm Área Pint. 121,00 m2 Nº Módulos Ø > 400mm 5 Preço Aço 12.942,5 € Preço Quinagens 227,0 € Preços Soldas 800,0 € Preço Pintura 2.904,0 € Preço Galvanização 7.515,0 € Preço Total 24.388,5 €			
Esp. Mod. 1 12 mm f (Hz) 39 Hz Esp. Mod. 2 12 mm α cr,N 15,95 Esp. Mod. 3 10 mm Segurança 1.0013 Esp. Mod. 4 8 mm Peso 14.067 Ton Esp. Mod. 5 6 (ov) Área Pint. 166,08 m2 Nº Módulos Ø > 400mm 5 Preço Aço 10.901,9 € Preço Quinagens 340,0 € Preços Soldas 426,0 € Preço Pintura 3.985,9 € Preço Galvanização 6.330,2 € Preço Total 21.984,0 €				Esp. Mod. 1 17 mm f (Hz) 31 Hz Esp. Mod. 2 18 mm α cr,N 9,63 Esp. Mod. 3 17 mm Segurança 1.0143 Esp. Mod. 4 15 mm Peso 16.074 Ton Esp. Mod. 5 9 mm Área Pint. 122,76 m2 Nº Módulos Ø > 400mm 5 Preço Aço 12.457,4 € Preço Quinagens 340,0 € Preços Soldas 800,0 € Preço Pintura 2.946,2 € Preço Galvanização 7.233,3 € Preço Total 23.776,9 €			
Altura: 46,5 m Ø Topo: 500 mm Ø Base: 1.800 mm Jorramento: 27,96 mm/m				Altura: 46,5 m Ø Topo: 500 mm Ø Base:			

8 Lados

Altura: 46,5 m  
Ø Topo: 200 mm  
Ø Base: 1.800 mm  
Jarramento: 34,41 mm/m

Exp. Mod. 1 16 (en) f (Hz) ,34 Hz  
Exp. Mod. 2 14 mm α cr,N 10,96  
Exp. Mod. 3 13 mm Segurança 1,0062  
Exp. Mod. 4 10 mm Peso 15,137 Ton  
Exp. Mod. 5 7 mm Área Pint. 142,36 m2  
Nº Módulos Ø > 400mm 5  
Preço Aço 12.261,0 €  
Preço Quinagins 227,0 €  
Preços Soldas 426,0 €  
Preço Pintura 3.416,6 €  
Preço Galvanização 6.811,7 €  
Preço Total 23.142,3 €

8 Lados

Altura: 46,5 m  
Ø Topo: 200 mm  
Ø Base: 1.700 mm  
Jarramento: 32,26 mm/m

Exp. Mod. 1 16 mm f (Hz) ,32 Hz  
Exp. Mod. 2 15 mm α cr,N 9,93  
Exp. Mod. 3 13 mm Segurança 1,0053  
Exp. Mod. 4 11 mm Peso 14,764 Ton  
Exp. Mod. 5 7 mm Área Pint. 137,20 m2  
Nº Módulos Ø > 400mm 5  
Preço Aço 11.958,8 €  
Preço Quinagins 227,0 €  
Preços Soldas 426,0 €  
Preço Pintura 3.245,8 €  
Preço Galvanização 6.643,8 €  
Preço Total 22.501,4 €

8 Lados

Altura: 46,5 m  
Ø Topo: 200 mm  
Ø Base: 1.600 mm  
Jarramento: 30,11 mm/m

Exp. Mod. 1 17 mm f (Hz) ,31 Hz  
Exp. Mod. 2 16 mm α cr,N 9,51  
Exp. Mod. 3 15 mm Segurança 1,0353  
Exp. Mod. 4 13 mm Peso 15,248 Ton  
Exp. Mod. 5 7 mm Área Pint. 128,12 m2  
Nº Módulos Ø > 400mm 4  
Preço Aço 12.350,9 €  
Preço Quinagins 227,0 €  
Preços Soldas 800,0 €  
Preço Pintura 3.074,9 €  
Preço Galvanização 6.861,6 €  
Preço Total 23.314,4 €

8 Lados

Altura: 46,5 m  
Ø Topo: 200 mm  
Ø Base: 1.500 mm  
Jarramento: 27,96 mm/m

Exp. Mod. 1 18 mm f (Hz) ,30 Hz  
Exp. Mod. 2 18 mm α cr,N 8,72  
Exp. Mod. 3 16 mm Segurança 1,0033  
Exp. Mod. 4 14 mm Peso 15,532 Ton  
Exp. Mod. 5 9 mm Área Pint. 121,00 m2  
Nº Módulos Ø > 400mm 4  
Preço Aço 12.580,9 €  
Preço Quinagins 227,0 €  
Preços Soldas 800,0 €  
Preço Pintura 2.904,0 €  
Preço Galvanização 6.989,4 €  
Preço Total 23.501,3 €

8 Lados

Altura: 46,5 m  
Ø Topo: 200 mm  
Ø Base: 1.400 mm  
Jarramento: 25,81 mm/m

Exp. Mod. 1 20 mm f (Hz) ,29 Hz  
Exp. Mod. 2 20 mm α cr,N 8,16  
Exp. Mod. 3 19 mm Segurança 1,0172  
Exp. Mod. 4 16 mm Peso 16,381 Ton  
Exp. Mod. 5 9 mm Área Pint. 113,89 m2  
Nº Módulos Ø > 400mm 4  
Preço Aço 13.268,6 €  
Preço Quinagins 227,0 €  
Preços Soldas 800,0 €  
Preço Pintura 2.733,4 €  
Preço Galvanização 7.371,5 €  
Preço Total 24.400,4 €

8 Lados

Altura: 46,5 m  
Ø Topo: 200 mm  
Ø Base: 1.300 mm  
Jarramento: 23,66 mm/m

Exp. Mod. 1 f (Hz)  
Exp. Mod. 2 α cr,N  
Exp. Mod. 3 Segurança  
Exp. Mod. 4 Peso  
Exp. Mod. 5 Área Pint.  
K.O. K.O.

8 Lados

Altura: 46,5 m  
Ø Topo: 200 mm  
Ø Base: 1.200 mm  
Jarramento: 21,51 mm/m

Exp. Mod. 1 f (Hz)  
Exp. Mod. 2 α cr,N  
Exp. Mod. 3 Segurança  
Exp. Mod. 4 Peso  
Exp. Mod. 5 Área Pint.  
K.O. K.O.

12 Lados

Altura: 46,5 m  
Ø Topo: 200 mm  
Ø Base: 1.800 mm  
Jarramento: 34,41 mm/m

Exp. Mod. 1 13 mm f (Hz) ,33 Hz  
Exp. Mod. 2 12 mm α cr,N 10,70  
Exp. Mod. 3 11 mm Segurança 1,0157  
Exp. Mod. 4 10 mm Peso 13,074 Ton  
Exp. Mod. 5 6 mm Área Pint. 144,42 m2  
Nº Módulos Ø > 400mm 5  
Preço Aço 10.589,9 €  
Preço Quinagins 340,0 €  
Preços Soldas 426,0 €  
Preço Pintura 3.466,1 €  
Preço Galvanização 5.883,3 €  
Preço Total 20.705,3 €

12 Lados

Altura: 46,5 m  
Ø Topo: 200 mm  
Ø Base: 1.700 mm  
Jarramento: 32,26 mm/m

Exp. Mod. 1 14 mm f (Hz) ,32 Hz  
Exp. Mod. 2 13 mm α cr,N 10,04  
Exp. Mod. 3 12 mm Segurança 1,0289  
Exp. Mod. 4 11 mm Peso 13,452 Ton  
Exp. Mod. 5 7 mm Área Pint. 137,20 m2  
Nº Módulos Ø > 400mm 5  
Preço Aço 10.896,1 €  
Preço Quinagins 340,0 €  
Preços Soldas 426,0 €  
Preço Pintura 3.292,8 €  
Preço Galvanização 6.053,4 €  
Preço Total 21.008,3 €

12 Lados

Altura: 46,5 m  
Ø Topo: 200 mm  
Ø Base: 1.600 mm  
Jarramento: 30,11 mm/m

Exp. Mod. 1 15 mm f (Hz) ,31 Hz  
Exp. Mod. 2 14 mm α cr,N 9,42  
Exp. Mod. 3 13 mm Segurança 1,0054  
Exp. Mod. 4 12 mm Peso 13,869 Ton  
Exp. Mod. 5 7 mm Área Pint. 129,98 m2  
Nº Módulos Ø > 400mm 4  
Preço Aço 11.233,9 €  
Preço Quinagins 340,0 €  
Preços Soldas 800,0 €  
Preço Pintura 3.119,5 €  
Preço Galvanização 6.241,1 €  
Preço Total 21.734,5 €

12 Lados

Altura: 46,5 m  
Ø Topo: 200 mm  
Ø Base: 1.500 mm  
Jarramento: 27,96 mm/m

Exp. Mod. 1 16 mm f (Hz) ,30 Hz  
Exp. Mod. 2 16 mm α cr,N 8,95  
Exp. Mod. 3 16 mm Segurança 1,0081  
Exp. Mod. 4 14 mm Peso 14,562 Ton  
Exp. Mod. 5 8 mm Área Pint. 122,76 m2  
Nº Módulos Ø > 400mm 4  
Preço Aço 11.795,2 €  
Preço Quinagins 340,0 €  
Preços Soldas 800,0 €  
Preço Pintura 2.946,2 €  
Preço Galvanização 6.552,9 €  
Preço Total 22.434,4 €

12 Lados

Altura: 46,5 m  
Ø Topo: 200 mm  
Ø Base: 1.400 mm  
Jarramento: 25,81 mm/m

Exp. Mod. 1 19 mm f (Hz) ,29 Hz  
Exp. Mod. 2 19 mm α cr,N 8,39  
Exp. Mod. 3 18 mm Segurança 1,0161  
Exp. Mod. 4 15 mm Peso 15,808 Ton  
Exp. Mod. 5 9 mm Área Pint. 115,54 m2  
Nº Módulos Ø > 400mm 4  
Preço Aço 12.804,5 €  
Preço Quinagins 340,0 €  
Preços Soldas 800,0 €  
Preço Pintura 2.773,0 €  
Preço Galvanização 7.113,6 €  
Preço Total 23.831,0 €

12 Lados

Altura: 46,5 m  
Ø Topo: 200 mm  
Ø Base: 1.300 mm  
Jarramento: 23,66 mm/m

Exp. Mod. 1 f (Hz)  
Exp. Mod. 2 α cr,N  
Exp. Mod. 3 Segurança  
Exp. Mod. 4 Peso  
Exp. Mod. 5 Área Pint.  
K.O. K.O.

12 Lados

Altura: 46,5 m  
Ø Topo: 200 mm  
Ø Base: 1.200 mm  
Jarramento: 21,51 mm/m

Exp. Mod. 1 f (Hz)  
Exp. Mod. 2 α cr,N  
Exp. Mod. 3 Segurança  
Exp. Mod. 4 Peso  
Exp. Mod. 5 Área Pint.  
K.O. K.O.

16 Lados

Altura: 46,5 m  
Ø Topo: 350 mm  
Ø Base: 1.800 mm  
Jarramento: 31,18 mm/m

Exp. Mod. 1 12 mm f (Hz) ,32 Hz  
Exp. Mod. 2 11 mm α cr,N 10,12  
Exp. Mod. 3 10 mm Segurança 1,0144  
Exp. Mod. 4 9 mm Peso 12,072 Ton  
Exp. Mod. 5 6 mm Área Pint. 145,15 m2  
Nº Módulos Ø > 400mm 5  
Preço Aço 9.778,3 €  
Preço Quinagins 453,0 €  
Preços Soldas 426,0 €  
Preço Pintura 3.483,6 €  
Preço Galvanização 5.432,4 €  
Preço Total 19.573,3 €

16 Lados

Altura: 46,5 m  
Ø Topo: 350 mm  
Ø Base: 1.700 mm  
Jarramento: 29,03 mm/m

Exp. Mod. 1 12 mm f (Hz) ,31 Hz  
Exp. Mod. 2 12 mm α cr,N 9,70  
Exp. Mod. 3 12 mm Segurança 1,0043  
Exp. Mod. 4 10 mm Peso 12,342 Ton  
Exp. Mod. 5 7 mm Área Pint. 137,89 m2  
Nº Módulos Ø > 400mm 5  
Preço Aço 9.997,0 €  
Preço Quinagins 453,0 €  
Preços Soldas 426,0 €  
Preço Pintura 3.309,4 €  
Preço Galvanização 5.553,9 €  
Preço Total 19.739,3 €

16 Lados

Altura: 46,5 m  
Ø Topo: 350 mm  
Ø Base: 1.600 mm  
Jarramento: 26,88 mm/m

Exp. Mod. 1 14 mm f (Hz) ,31 Hz  
Exp. Mod. 2 14 mm α cr,N 9,39  
Exp. Mod. 3 13 mm Segurança 1,0205  
Exp. Mod. 4 12 mm Peso 13,387 Ton  
Exp. Mod. 5 7 mm Área Pint. 130,63 m2  
Nº Módulos Ø > 400mm 5  
Preço Aço 10.843,5 €  
Preço Quinagins 453,0 €  
Preços Soldas 800,0 €  
Preço Pintura 3.135,1 €  
Preço Galvanização 6.024,2 €  
Preço Total 21.255,7 €

16 Lados

Altura: 46,5 m  
Ø Topo: 350 mm  
Ø Base: 1.500 mm  
Jarramento: 24,73 mm/m

Exp. Mod. 1 16 mm f (Hz) ,30 Hz  
Exp. Mod. 2 16 mm α cr,N 8,88  
Exp. Mod. 3 15 mm Segurança 1,0310  
Exp. Mod. 4 13 mm Peso 14,333 Ton  
Exp. Mod. 5 8 mm Área Pint. 123,38 m2  
Nº Módulos Ø > 400mm 5  
Preço Aço 11.609,7 €  
Preço Quinagins 453,0 €  
Preços Soldas 800,0 €  
Preço Pintura 2.961,1 €  
Preço Galvanização 6.449,9 €  
Preço Total 22.273,7 €

16 Lados

Altura: 46,5 m  
Ø Topo: 350 mm  
Ø Base: 1.400 mm  
Jarramento: 22,58 mm/m

Exp. Mod. 1 18 mm f (Hz) ,29 Hz  
Exp. Mod. 2 18 mm α cr,N 8,32  
Exp. Mod. 3 17 mm Segurança 1,0145  
Exp. Mod. 4 15 mm Peso 15,172 Ton  
Exp. Mod. 5 9 mm Área Pint. 116,12 m2  
Nº Módulos Ø > 400mm 5  
Preço Aço 12.289,3 €  
Preço Quinagins 453,0 €  
Preços Soldas 800,0 €  
Preço Pintura 2.786,9 €  
Preço Galvanização 6.827,4 €  
Preço Total 23.156,6 €

16 Lados

Altura: 46,5 m  
Ø Topo: 350 mm  
Ø Base: 1.300 mm  
Jarramento: 20,43 mm/m

Exp. Mod. 1 f (Hz)  
Exp. Mod. 2 α cr,N  
Exp. Mod. 3 Segurança  
Exp. Mod. 4 Peso  
Exp. Mod. 5 Área Pint.  
K.O. K.O.

16 Lados

Altura: 46,5 m  
Ø Topo: 350 mm  
Ø Base: 1.200 mm  
Jarramento: 18,28 mm/m

Exp. Mod. 1 f (Hz)  
Exp. Mod. 2 α cr,N  
Exp. Mod. 3 Segurança  
Exp. Mod. 4 Peso  
Exp. Mod. 5 Área Pint.  
K.O. K.O.

8 Lados

Altura: 46,5 m  
Ø Topo: 200 mm  
Ø Base: 1.800 mm  
Jarramento: 34,41 mm/m

Exp. Mod. 1 16 (en) f (Hz) ,37 Hz  
Exp. Mod. 2 14 mm α cr,N 14,09  
Exp. Mod. 3 12 mm Segurança 1,0056  
Exp. Mod. 4 9 mm Peso 15,511 Ton  
Exp. Mod. 5 5 mm Área Pint. 153,04 m2  
Nº Módulos Ø > 400mm 5  
Preço Aço 12.563,9 €  
Preço Quinagins 227,0 €  
Preços Soldas 426,0 €  
Preço Pintura 3.673,0 €  
Preço Galvanização 6.980,0 €  
Preço Total 23.869,8 €

8 Lados

Altura: 46,5 m  
Ø Topo: 200 mm  
Ø Base: 1.700 mm  
Jarramento: 32,26 mm/m

Exp. Mod. 1 16 mm f (Hz) ,35 Hz  
Exp. Mod. 2 15 mm α cr,N 12,77  
Exp. Mod. 3 12 mm Segurança 1,0000  
Exp. Mod. 4 10 mm Peso 15,198 Ton  
Exp. Mod. 5 5 mm Área Pint. 145,92 m2  
Nº Módulos Ø > 400mm 5  
Preço Aço 12.310,4 €  
Preço Quinagins 227,0 €  
Preços Soldas 426,0 €  
Preço Pintura 3.502,1 €  
Preço Galvanização 6.839,1 €  
Preço Total 23.304,6 €

8 Lados

Altura: 46,5 m  
Ø Topo: 200 mm  
Ø Base: 1.600 mm  
Jarramento: 30,11 mm/m

Exp. Mod. 1 17 mm f (Hz) ,34 Hz  
Exp. Mod. 2 16 mm α cr,N 11,60  
Exp. Mod. 3 13 mm Segurança 1,0257  
Exp. Mod. 4 10 mm Peso 15,254 Ton  
Exp. Mod. 5 5 mm Área Pint. 138,80 m2  
Nº Módulos Ø > 400mm 5  
Preço Aço 12.355,7 €  
Preço Quinagins 227,0 €  
Preços Soldas 426,0 €  
Preço Pintura 3.331,2 €  
Preço Galvanização 6.864,3 €  
Preço Total 23.204,2 €

8 Lados

Altura: 46,5 m  
Ø Topo: 200 mm  
Ø Base: 1.500 mm  
Jarramento: 27,96 mm/m

Exp. Mod. 1 18 mm f (Hz) ,32 Hz  
Exp. Mod. 2 17 mm α cr,N 10,59  
Exp. Mod. 3 14 mm Segurança 1,0024  
Exp. Mod. 4 11 mm Peso 15,356 Ton  
Exp. Mod. 5 5 mm Área Pint. 131,68 m2  
Nº Módulos Ø > 400mm 5  
Preço Aço 12.438,4 €  
Preço Quinagins 227,0 €  
Preços Soldas 426,0 €  
Preço Pintura 3.160,3 €  
Preço Galvanização 6.910,2 €  
Preço Total 23.161,9 €

8 Lados

Altura: 46,5 m  
Ø Topo: 200 mm  
Ø Base: 1.400 mm  
Jarramento: 25,81 mm/m

Exp. Mod. 1 20 mm f (Hz) ,31 Hz  
Exp. Mod. 2 19 mm α cr,N 9,89  
Exp. Mod. 3 16 mm Segurança 1,0255  
Exp. Mod. 4 12 mm Peso 16,149 Ton  
Exp. Mod. 5 6 mm Área Pint. 124,56 m2  
Nº Módulos Ø > 400mm 5  
Preço Aço 13.080,7 €  
Preço Quinagins 227,0 €  
Preços Soldas 426,0 €  
Preço Pintura 2.989,4 €  
Preço Galvanização 7.267,1 €  
Preço Total 23.990,2 €

8 Lados

Altura: 46,5 m  
Ø Topo: 200 mm  
Ø Base: 1.300 mm  
Jarramento: 23,66 mm/m

Exp. Mod. 1 f (Hz)  
Exp. Mod. 2 α cr,N  
Exp. Mod. 3 Segurança  
Exp. Mod. 4 Peso  
Exp. Mod. 5 Área Pint.  
K.O. K.O.

8 Lados

Altura: 46,5 m  
Ø Topo: 200 mm  
Ø Base: 1.200 mm  
Jarramento: 21,51 mm/m

Exp. Mod. 1 f (Hz)  
Exp. Mod. 2 α cr,N  
Exp. Mod. 3 Segurança  
Exp. Mod. 4 Peso  
Exp. Mod. 5 Área Pint.  
K.O. K.O.

12 Lados

Altura: 46,5 m  
Ø Topo: 200 mm  
Ø Base: 1.800 mm  
Jarramento: 34,41 mm/m

Exp. Mod. 1 13 mm f (Hz) ,36 Hz  
Exp. Mod. 2 12 mm α cr,N 13,12  
Exp. Mod. 3 10 mm Segurança 1,0327  
Exp. Mod. 4 8 mm Peso 13,255 Ton  
Exp. Mod. 5 5 (ov) Área Pint. 155,25 m2  
Nº Módulos Ø > 400mm 5  
Preço Aço 10.736,6 €  
Preço Quinagins 340,0 €  
Preços Soldas 426,0 €  
Preço Pintura 3.726,0 €  
Preço Galvanização 5.964,8 €  
Preço Total 21.193,3 €

12 Lados

Altura: 46,5 m  
Ø Topo: 200 mm  
Ø Base: 1.700 mm  
Jarramento: 32,26 mm/m

Exp. Mod. 1 14 mm f (Hz) ,34 Hz  
Exp. Mod. 2 13 mm α cr,N 12,12  
Exp. Mod. 3 11 mm Segurança 1,0144  
Exp. Mod. 4 8 mm Peso 13,517 Ton  
Exp. Mod. 5 5 (ov) Área Pint. 148,03 m2  
Nº Módulos Ø > 400mm 5  
Preço Aço 10.948,8 €  
Preço Quinagins 340,0 €  
Preços Soldas 426,0 €  
Preço Pintura 3.552,7 €  
Preço Galvanização 6.082,7 €  
Preço Total 21.350,1 €

12 Lados

Altura: 46,5 m  
Ø Topo: 200 mm  
Ø Base: 1.600 mm  
Jarramento: 30,11 mm/m

Exp. Mod. 1 14 mm f (Hz) ,33 Hz  
Exp. Mod. 2 14 mm α cr,N 11,22  
Exp. Mod. 3 12 mm Segurança 1,0027  
Exp. Mod. 4 9 mm Peso 13,475 Ton  
Exp. Mod. 5 5 mm Área Pint. 140,81 m2  
Nº Módulos Ø > 400mm 5  
Preço Aço 10.914,8 €  
Preço Quinagins 340,0 €  
Preços Soldas 426,0 €  
Preço Pintura 3.379,4 €  
Preço Galvanização 6.063,8 €  
Preço Total 21.123,9 €

12 Lados

Altura: 46,5 m  
Ø Topo: 200 mm  
Ø Base: 1.500 mm  
Jarramento: 27,96 mm/m

Exp. Mod. 1 16 mm f (Hz) ,31 Hz  
Exp. Mod. 2 15 mm α cr,N 10,44  
Exp. Mod. 3 13 mm Segurança 1,0032  
Exp. Mod. 4 10 mm Peso 14,035 Ton  
Exp. Mod. 5 5 mm Área Pint. 133,59 m2  
Nº Módulos Ø > 400mm 5  
Preço Aço 11.368,4 €  
Preço Quinagins 340,0 €  
Preços Soldas 426,0 €  
Preço Pintura 3.206,2 €  
Preço Galvanização 6.315,8 €  
Preço Total 21.656,3 €

12 Lados

Altura: 46,5 m  
Ø Topo: 200 mm  
Ø Base: 1.400 mm  
Jarramento: 25,81 mm/m

Exp. Mod. 1 18 mm f (Hz) ,31 Hz  
Exp. Mod. 2 18 mm α cr,N 10,00  
Exp. Mod. 3 15 mm Segurança 1,0177  
Exp. Mod. 4 11 mm Peso 15,128 Ton  
Exp. Mod. 5 5 mm Área Pint. 126,37 m2  
Nº Módulos Ø > 400mm 5  
Preço Aço 12.253,7 €  
Preço Quinagins 340,0 €  
Preços Soldas 426,0 €  
Preço Pintura 3.032,9 €  
Preço Galvanização 6.807,6 €  
Preço Total 22.860,2 €

12 Lados

Altura: 46,5 m  
Ø Topo: 200 mm  
Ø Base: 1.300 mm  
Jarramento: 23,66 mm/m

Exp. Mod. 1 f (Hz)  
Exp. Mod. 2 α cr,N  
Exp. Mod. 3 Segurança  
Exp. Mod. 4 Peso  
Exp. Mod. 5 Área Pint.  
K.O. K.O.

12 Lados

Altura: 46,5 m  
Ø Topo: 200 mm  
Ø Base: 1.200 mm  
Jarramento: 21,51 mm/m

Exp. Mod. 1 f (Hz)  
Exp. Mod. 2 α cr,N  
Exp. Mod. 3 Segurança  
Exp. Mod. 4 Peso  
Exp. Mod. 5 Área Pint.  
K.O. K.O.

16 Lados

Altura: 46,5 m  
Ø Topo: 350 mm  
Ø Base: 1.800 mm  
Jarramento: 31,18 mm/m

Exp. Mod. 1 11 mm f (Hz) ,34 Hz  
Exp. Mod. 2 11 (ov) α cr,N 12,11  
Exp. Mod. 3 9 mm Segurança 1,0327  
Exp. Mod. 4 7 mm Peso 11,782 Ton  
Exp. Mod. 5 5 (ov) Área Pint. 156,03 m2  
Nº Módulos Ø > 400mm 5  
Preço Aço 9.466,6 €  
Preço Quinagins 453,0 €  
Preços Soldas 426,0 €  
Preço Pintura 3.744,7 €  
Preço Galvanização 5.301,9 €  
Preço Total 19.469,9 €

16 Lados

Altura: 46,5 m  
Ø Topo: 350 mm  
Ø Base: 1.700 mm  
Jarramento: 29,03 mm/m

Exp. Mod. 1 12 mm f (Hz) ,33 Hz  
Exp. Mod. 2 11 mm α cr,N 11,36  
Exp. Mod. 3 10 mm Segurança 1,0231  
Exp. Mod. 4 8 mm Peso 11,985 Ton  
Exp. Mod. 5 5 (ov) Área Pint. 148,78 m2  
Nº Módulos Ø > 400mm 5  
Preço Aço 9.707,9 €  
Preço Quinagins 453,0 €  
Preços Soldas 426,0 €  
Preço Pintura 3.570,7 €  
Preço Galvanização 5.393,3 €  
Preço Total 19.550,8 €

16 Lados

Altura: 46,5 m  
Ø Topo: 350 mm  
Ø Base: 1.600 mm  
Jarramento: 26,88 mm/m

Exp. Mod. 1 13 mm f (Hz) ,32 Hz  
Exp. Mod. 2 13 mm α cr,N 10,89  
Exp. Mod. 3 11 mm Segurança 1,0131  
Exp. Mod. 4 8 mm Peso 12,680 Ton  
Exp. Mod. 5 5 (ov) Área Pint. 141,52 m2  
Nº Módulos Ø > 400mm 5  
Preço Aço 10.270,8 €  
Preço Quinagins 453,0 €  
Preços Soldas 426,0 €  
Preço Pintura 3.396,5 €  
Preço Galvanização 5.706,0 €  
Preço Total 20.252,3 €

16 Lados

Altura: 46,5 m  
Ø Topo: 350 mm  
Ø Base: 1.500 mm  
Jarramento: 24,73 mm/m

Exp. Mod. 1 15 mm f (Hz) ,31 Hz  
Exp. Mod. 2 14 mm α cr,N 10,40  
Exp. Mod. 3 13 mm Segurança 1,0016  
Exp. Mod. 4 10 mm Peso 13,503 Ton  
Exp. Mod. 5 5 (ov) Área Pint. 134,26 m2  
Nº Módulos Ø > 400mm 5  
Preço Aço 10.937,4 €  
Preço Quinagins 453,0 €  
Preços Soldas 426,0 €  
Preço Pintura 3.222,2 €  
Preço Galvanização 6.076,4 €  
Preço Total 21.115,0 €

16 Lados

Altura: 46,5 m  
Ø Topo: 350 mm  
Ø Base: 1.400 mm  
Jarramento: 22,58 mm/m

Exp. Mod. 1 18 mm f (Hz) ,31 Hz  
Exp. Mod. 2 17 mm α cr,N 9,92  
Exp. Mod. 3 14 mm Segurança 1,0016  
Exp. Mod. 4 11 mm Peso 14,762 Ton  
Exp. Mod. 5 5 mm Área Pint. 127,00 m2  
Nº Módulos Ø > 400mm 5  
Preço Aço 11.957,2 €  
Preço Quinagins 453,0 €  
Preços Soldas 426,0 €  
Preço Pintura 3.048,0 €  
Preço Galvanização 6.645,9 €  
Preço Total 22.527,1 €

16 Lados

Altura: 46,5 m  
Ø Topo: 350 mm  
Ø Base: 1.300 mm  
Jarramento: 20,43 mm/m

Exp. Mod. 1 20 mm f (Hz) ,29 Hz  
Exp. Mod. 2 19 mm α cr,N 9,31  
Exp. Mod. 3 17 mm Segurança 1,0088  
Exp. Mod. 4 12 mm Peso 15,590 Ton  
Exp. Mod. 5 5 mm Área Pint. 119,75 m2  
Nº Módulos Ø > 400mm 5  
Preço Aço 12.627,9 €  
Preço Quinagins 453,0 €  
Preços Soldas 426,0 €  
Preço Pintura 2.874,0 €  
Preço Galvanização 7.015,5 €  
Preço Total 23.396,4 €

16 Lados

Altura: 46,5 m  
Ø Topo: 350 mm  
Ø Base: 1.200 mm  
Jarramento: 18,28 mm/m

Exp. Mod. 1 f (Hz)  
Exp. Mod. 2 α cr,N  
Exp. Mod. 3 Segurança  
Exp. Mod. 4 Peso  
Exp. Mod. 5 Área Pint.  
K.O. K.O.

16 Lados

Altura: 46,5 m  
Ø Topo: 350 mm  
Ø Base: 1.200 mm  
Jarramento: 18,28 mm/m

Exp. Mod. 1 f (Hz)  
Exp. Mod. 2 α cr,N  
Exp. Mod. 3 Segurança  
Exp. Mod. 4 Peso  
Exp. Mod. 5 Área Pint.  
K.O. K.O.

8 Lados

Altura: 46,5 m  
Ø Topo: 200 mm  
Ø Base: 1.800 mm  
Jarramento: 34,41 mm/m

Exp. Mod. 1 16 (en) f (Hz) ,40 Hz  
Exp. Mod. 2 14 mm α cr,N 16,81  
Exp. Mod. 3 11 mm Segurança 1,0185  
Exp. Mod. 4 9 (en) Peso 16,157 Ton  
Exp. Mod. 5 6 (ov) Área Pint. 163,71 m2  
Nº Módulos Ø > 400mm 5  
Preço Aço 13.087,2 €  
Preço Quinagins 227,0 €  
Preços Soldas 426,0 €  
Preço Pintura 3.929,0 €  
Preço Galvanização 7.270,7 €  
Preço Total 24.939,9 €

8 Lados

Altura: 46,5 m  
Ø Topo: 200 mm  
Ø Base: 1.700 mm  
Jarramento: 32,26 mm/m

Exp. Mod. 1 16 mm f (Hz) ,37 Hz  
Exp. Mod. 2 14 mm α cr,N 15,08  
Exp. Mod. 3 12 mm Segurança 1,0141  
Exp. Mod. 4 9 mm Peso 15,647 Ton  
Exp. Mod. 5 6 (ov) Área Pint. 156,59 m2  
Nº Módulos Ø > 400mm 5  
Preço Aço 12.674,1 €  
Preço Quinagins 227,0 €  
Preços Soldas 426,0 €  
Preço Pintura 3.758,2 €  
Preço Galvanização 7.041,2 €  
Preço Total 24.126,4 €

8 Lados

Altura: 46,5 m  
Ø Topo: 200 mm  
Ø Base: 1.600 mm  
Jarramento: 30,11 mm/m

Exp. Mod. 1 17 mm f (Hz) ,36 Hz  
Exp. Mod. 2 15 mm α cr,N 13,81  
Exp. Mod. 3 13 mm Segurança 1,0326  
Exp. Mod. 4 9 mm Peso 15,761 Ton  
Exp. Mod. 5 6 (ov) Área Pint. 149,48 m2  
Nº Módulos Ø > 400mm 5  
Preço Aço 12.766,4 €  
Preço Quinagins 227,0 €  
Preços Soldas 426,0 €  
Preço Pintura 3.587,5 €  
Preço Galvanização 7.092,5 €  
Preço Total 24.099,4 €

8 Lados

Altura: 46,5 m  
Ø Topo: 200 mm  
Ø Base: 1.500 mm  
Jarramento: 27,96 mm/m

Exp. Mod. 1 18 mm f (Hz) ,34 Hz  
Exp. Mod. 2 16 mm α cr,N 12,25  
Exp. Mod. 3 13 mm Segurança 1,0015  
Exp. Mod. 4 9 mm Peso 15,551 Ton  
Exp. Mod. 5 6 (ov) Área Pint. 142,36 m2  
Nº Módulos Ø > 400mm 5  
Preço Aço 12.596,3 €  
Preço Quinagins 227,0 €  
Preços Soldas 426,0 €  
Preço Pintura 3.416,6 €  
Preço Galvanização 6.998,0 €  
Preço Total 23.663,9 €

8 Lados

Altura: 46,5 m  
Ø Topo: 200 mm  
Ø Base: 1.400 mm  
Jarramento: 25,81 mm/m

Exp. Mod. 1 20 mm f (Hz) ,32 Hz  
Exp. Mod. 2 18 mm α cr,N 11,39  
Exp. Mod. 3 14 mm Segurança 1,0073  
Exp. Mod. 4 10 mm Peso 16,211 Ton  
Exp. Mod. 5 6 (ov) Área Pint. 135,24 m2  
Nº Módulos Ø > 400mm 5  
Preço Aço 13.130,9 €  
Preço Quinagins 227,0 €  
Preços Soldas 426,0 €  
Preço Pintura 3.245,8 €  
Preço Galvanização 7.295,0 €  
Preço Total 24.324,6 €

8 Lados

Altura: 46,5 m  
Ø Topo: 200 mm  
Ø Base: 1.300 mm  
Jarramento: 23,66 mm/m

Exp. Mod. 1 f (Hz)  
Exp. Mod. 2 α cr,N  
Exp. Mod. 3 Segurança  
Exp. Mod. 4 Peso  
Exp. Mod. 5 Área Pint.  
K.O. K.O.

8 Lados

Altura: 46,5 m  
Ø Topo: 200 mm  
Ø Base: 1.200 mm  
Jarramento: 21,51 mm/m

Exp. Mod. 1 f (Hz)  
Exp. Mod. 2 α cr,N  
Exp. Mod. 3 Segurança  
Exp. Mod. 4 Peso  
Exp. Mod. 5 Área Pint.  
K.O. K.O.

12 Lados





## **ANEXO A2 – APLICAÇÃO INFORMÁTICA DESENVOLVIDA**

Características Físicas do Poste																																				
Altura (m):		46,50	Ø Topo (mm):		350	Geometria:		12	ps (kg/m³)		7850	Área face exterior (m²)		12,937717	Modulo 1 (m/mm)		10,0	15 <th colspan="2">Modulo 4 (m/mm)</th> <td>10,00</td> <th colspan="2">10<th colspan="2">Modulo 7 (m/mm)</th><td>0,00</td><td colspan="2">0</td></th>		Modulo 4 (m/mm)		10,00	10 <th colspan="2">Modulo 7 (m/mm)</th> <td>0,00</td> <td colspan="2">0</td>		Modulo 7 (m/mm)		0,00	0								
Discretização da altura (m):		0,5	Ø Base (mm):		1800	b exterior base (m):		0,465874	n <sub>b</sub> (kg/m)		124,6	fy (MPa)		550,0	Modulo 2 (m/mm)		10,0	15 <th colspan="2">Modulo 5 (m/mm)</th> <td>6,50</td> <th colspan="2">6<th colspan="2">Modulo 8 (m/mm)</th><td>0,00</td><td colspan="2">0</td></th>		Modulo 5 (m/mm)		6,50	6 <th colspan="2">Modulo 8 (m/mm)</th> <td>0,00</td> <td colspan="2">0</td>		Modulo 8 (m/mm)		0,00	0								
Número de disc. N:		93,00	Jorramento (mm/m):		31,2	a"		30,0	b exterior topo (m):		0,090587	Área Pintura Poste (m²)		155,253	Modulo 3 (m/mm)		10,0	12 <th colspan="2">Modulo 6 (m/mm)</th> <td>0,00</td> <th colspan="2">0<th colspan="2"></th><th colspan="2"></th></th>		Modulo 6 (m/mm)		0,00	0 <th colspan="2"></th> <th colspan="2"></th>													
Altura z (m)	Cálculo da área da secção do poste												Cálculo da massa equivalente										Cálculo da massa do Poste							Cálculo da classe de cada secção						
	Ø exterior b (mm)	Espessura (mm)	Raio exterior (m)	Largura, l (m)	Apótema (m)	A <sub>ext</sub> polígono (m²)	Raio interior (m)	Largura, l (m)	Apótema (m)	A <sub>int</sub> polígono (m²)	A secção (m²)	m(z) (Kg/m)	φ(z)	φ(z)²	m(z) x φ(z)²	(b-a)/6	f(a)+4f(a+b/2)+f(b)	∫ m(z) x φ(z)² dz	f(a)+4f(a+b/2)+f(b)	∫ φ(z)² dz	m(z) (Kg/m)	m(z) (Kg)	Raio médio (m)	Largura, b méd (m)	Espessura (m)	b/l	ε	Classe								
0	1800,00	15	0,9	0,465874281	0,869332244	2,43	0,884470857	0,457835805	0,854332244	2,346866092	0,083133908	652,601176	0	0	0	0	0,166666667	0,000117136	2,86227E-05	4,456E-08	652,6011762	324,8751005	0,892235429	0,461855043	0,015	30,79033622	0,65	Classe 4								
0,5	1784,41	15	0,892204301	0,46183893	0,861803177	2,380085545	0,876675158	0,458900455	0,846803177	2,305678	0,082407545	646,899226	0,000116	1,33681E-08	8,64778E-06	0	0,166666667	0,000117136	2,86227E-05	4,456E-08	646,8992256	322,0241252	0,88443973	0,457819693	0,015	30,52131284	0,65	Classe 4								
1	1768,82	15	0,884406802	0,45780358	0,854273111	2,346535727	0,8686979459	0,449765104	0,839273111	2,264985455	0,081681182	641,197275	0,000162	2,13898E-07	0,000137145	0	0,166666667	0,0005044927	0,000840821	1,328E-06	641,1972751	319,1731499	0,876644031	0,453784942	0,015	30,25228946	0,65	Classe 4								
1,5	1753,23	15	0,876612903	0,453768229	0,846743043	2,305350546	0,861083761	0,445729753	0,831743043	2,224395728	0,080954818	635,495325	0,001041	1,08281E-06	0,000688122	0	0,166666667	0,0005044927	0,000840821	1,328E-06	635,4953245	316,3221746	0,868848332	0,449748931	0,015	29,98326608	0,65	Classe 4								
2	1737,63	15	0,868817204	0,449732878	0,839212976	2,264530003	0,853288062	0,441694403	0,824212976	2,184301508	0,080228455	629,793374	0,00185	3,42222E-06	0,002155293	0	0,166666667	0,003732611	0,005621018	9,028E-06	629,793374	313,4711994	0,861052633	0,44571364	0,015	29,714227	0,65	Classe 4								
2,5	1722,04	15	0,861021505	0,445697528	0,831682909	2,224074098	0,845492363	0,437659052	0,816682909	2,144572006	0,079502092	624,091423	0,002891	8,35503E-06	0,005214305	0	0,166666667	0,003732611	0,005621018	9,028E-06	624,0914235	310,6202241	0,853256934	0,44167829	0,015	29,445219319	0,65	Classe 4								
3	1706,45	15	0,853225806	0,441662177	0,824152842	2,18398283	0,837696664	0,433623701	0,809152842	2,105207101	0,078775729	618,389473	0,004162	1,7325E-05	0,0101713597	0	0,166666667	0,0122610413	0,020435069	0,000200467	618,3894729	307,792488	0,845641235	0,437642939	0,015	29,176195939	0,65	Classe 4								
3,5	1690,86	15	0,845430108	0,437626826	0,816622775	2,1442562	0,829009065	0,42958835	0,801622775	2,066206834	0,078049366	616,687522	0,005665	3,20967E-05	0,019665247	0	0,166666667	0,0122610413	0,020435069	0,000200467	616,6875224	304,9182736	0,837665536	0,433607588	0,015	28,907172558	0,65	Classe 4								
4	1675,27	15	0,837634409	0,433591476	0,809092708	2,104894207	0,822105266	0,425553	0,794092708	2,0275171205	0,077323003	606,985572	0,0074	5,7756E-05	0,033325829	0	0,166666667	0,0323802578	0,053967096	0,000539267	606,9855718	302,0672983	0,829869837	0,429572238	0,015	28,63814718	0,65	Classe 4								
4,5	1659,68	15	0,82983871	0,429556125	0,801562641	2,065896852	0,814309567	0,421517649	0,786562641	1,989300123	0,076596464	601,283621	0,009365	8,77078E-05	0,052373267	0	0,166666667	0,0323802578	0,053967096	0,000539267	601,2836213	299,216323	0,822074138	0,425536887	0,015	28,369125978	0,65	Classe 4								
5	1644,09	15	0,822043011	0,425520774	0,794032574	2,027264135	0,806513868	0,417482298	0,779032574	1,951393858	0,075870277	595,581671	0,011562	0,000133681	0,079617682	0	0,166666667	0,0323802578	0,053967096	0,000539267	595,5816707	296,3653477	0,814278439	0,421501536	0,015	28,100102418	0,65	Classe 4								
5,5	1628,49	15	0,814247312	0,421485423	0,786502507	1,988996054	0,798718169	0,413446948	0,771502507	1,913852141	0,075143913	589,87972	0,01399	0,000195722	0,115452523	0	0,166666667	0,0703360758	0,117226793	0,001193767	589,8797202	293,5143725	0,80648274	0,417466186	0,015	27,830719038	0,65	Classe 4								
6	1612,90	15	0,806451613	0,417450073	0,778972441	1,951092612	0,79092247	0,409411597	0,763972441	1,876675062	0,07441755	584,17777	0,016649	0,0002772	0,1618934064	0	0,166666667	0,0703360758	0,117226793	0,001193767	584,1777697	290,6633972	0,798687042	0,413430835	0,015	27,56205566	0,65	Classe 4								
6,5	1597,31	15	0,798659914	0,413414272	0,771144237	1,83986262	0,783126771	0,405376246	0,756441237	1,78396262	0,073691187	578,475819	0,01954	0,000381805	0,220864962	0	0,166666667	1,339540317	0,223256719	0,0003863	578,4758191	287,8124219	0,790891343	0,409395484	0,015	27,29303228	0,65	Classe 3								
7	1581,72	15	0,790860215	0,409379371	0,763912307	1,876379639	0,775331072	0,401340896	0,748912307	1,803414815	0,072964824	572,773869	0,022662	0,000513547	0,29414605	0	0,166666667	2,321037631	0,386839605	0,004096667	572,7738686	284,961446	0,783095644	0,405360133	0,015	27,0240089	0,65	Classe 3								
7,5	1566,13	15	0,783064516	0,405344021	0,75638224	1,839570234	0,767535373	0,397305545	0,7383770319	1,767331689	0,072238641	567,071918	0,026015	0,000676758	0,383770319	0	0,166666667	2,321037631	0,386839605	0,004096667	567,0719182	282,1104714	0,775299945	0,401324783	0,015	26,75489552	0,65	Classe 3								
8	1550,54	15	0,775268817	0,40130867	0,748852173	1,803125217	0,759739674	0,393270194	0,733852173	1,731613119	0,071512098	561,369967	0,029599	0,000876089	0,49180995	0	0,166666667	2,321037631	0,386839605	0,004096667	561,3699675	279,2594961	0,767504246	0,397289432	0,015	26,48596214	0,65	Classe 3								
8,5	1534,95	15	0,767473118	0,397273319	0,73732106	1,767044962	0,751943976	0,389234843	0,726322106	1,696259227	0,070785735	555,668017	0,033414	0,001166513	0,620410718	0	0,166666667	3,745233887	0,624205648	0,0011242	555,6680169	276,4085208	0,759708547	0,393254081	0,015	26,21497387										

Ação do Vento																									
Altura (m):	46,5	Ø Topo (mm):	350	Geometria:	12	Ø médio (mm)	1075	ψA	0,8667	B²	0,6909	Cr(Zs)	1,4258	S <sub>c</sub> (Zs,n)	0,1112	Ø(Zs) (mm)	930	δd	0	ηb	0,0134	R²	0,4061	lv(Zs)	0,1023
Discretização da altura (m):	0,5	Ø Base (mm):	1800	Raio curvatura canto (mm):	10	l/b	43,2558	Zs (m)	27,9	n (Hz)	0,3800	Co(Zs)	1,0700	m <sub>s</sub> (Kg/m)	124,6	δa	0,5357	δ	0,5477	Rh	0,4091	v (Hz)	0,0800	Cs	0,9296
Número de disc. N:	93	Jorramento (mm/m):	31,2	Rugosidade eq. (mm):	0,02	λ	70,0000	L(Zs) (m)	142,053	f <sub>1</sub> (Zs,n)	1,1794	Vm (Zs)	45,7688	Cf(Zs)	0,9533	δs	0,012	ηh	1,7759	Rb	0,9911	Kp	3,0000	Cd	1,0299
Altura z (m)	Velocidade média vento (m/s)			Pressão dinâmica pico (Pa)		Coeficiente de força Cf						Coef. Estrutural CsCd		Força do Vento											
	Cr (z)	Co	Vm (z)	lv (z)	Op (z)	Ø exterior b (mm)	Reynolds	r/b	k/b	Cf,0	Cf	CsCd	Aref (m²)	F <sub>w</sub> (z) (kN)											
0	0,906	1,07	29,09653594	0,160880777	1125,018456	1800	3491584,313	0,005555556	1,1111E-05	1,1	0,953333	0,957332288	0	0											
0,5	0,906	1,07	29,09653594	0,160880777	1125,018456	1784,408602	3461340,601	0,005604098	1,1208E-05	1,1	0,953333	0,957332288	0,896102	0,920078011											
1	0,906	1,07	29,09653594	0,160880777	1125,018456	1768,817204	3431096,89	0,005653495	1,1307E-05	1,1	0,953333	0,957332288	0,888306	0,912073733											
1,5	0,970	1,07	31,12740867	0,150384292	1243,052091	1753,225806	3638225,078	0,005703772	1,1408E-05	1,1	0,953333	0,957332288	0,880511	0,998921769											
2	1,015	1,07	32,5683358	0,143730811	1329,924919	1737,634409	3772790,728	0,00575495	1,151E-05	1,1	0,953333	0,957332288	0,872715	1,059270984											
2,5	1,049	1,07	33,68600572	0,138961958	1399,096012	1722,043011	3867250,047	0,005807056	1,1614E-05	1,1	0,953333	0,957332288	0,864919	1,104410735											
3	1,078	1,07	34,59920853	0,135294231	1456,772034	1706,451613	3936125,014	0,005860113	1,172E-05	1,1	0,953333	0,957332288	0,857124	1,139574079											
3,5	1,102	1,07	35,37131051	0,132340964	1506,349682	1690,860215	3987196,113	0,005914419	1,1828E-05	1,1	0,953333	0,957332288	0,849328	1,167639303											
4	1,123	1,07	36,04013567	0,129885008	1549,898125	1675,268817	4025127,697	0,005969191	1,1938E-05	1,1	0,953333	0,957332288	0,841532	1,190368447											
4,5	1,141	1,07	36,63008126	0,127793146	1588,774703	1659,677419	4052941,25	0,006025267	1,2051E-05	1,1	0,953333	0,957332288	0,833737	1,208923019											
5	1,158	1,07	37,15780558	0,125978196	1623,919626	1644,086022	4072708,583	0,006082407	1,2165E-05	1,1	0,953333	0,957332288	0,825941	1,22411147											
5,5	1,172	1,07	37,6351903	0,124380222	1656,011965	1628,494624	4085913,671	0,00614064	1,2281E-05	1,1	0,953333	0,957332288	0,818145	1,236520503											
6	1,186	1,07	38,0710084	0,122956378	1685,55872	1612,903226	4093656,817	0,0062	0,0000124	1,1	0,953333	0,957332288	0,810349	1,246590233											
6,5	1,199	1,07	38,47192219	0,121675057	1712,94876	1597,311828	4096777,09	0,006260518	1,2521E-05	1,1	0,953333	0,957332288	0,802554	1,254659827											
7	1,210	1,07	38,84311038	0,120512319	1738,487098	1581,72043	4095929,417	0,00632223	1,2644E-05	1,1	0,953333	0,957332288	0,794758	1,260996556											
7,5	1,221	1,07	39,18867832	0,119449635	1762,417527	1566,129032	4091635,123	0,00638517	1,277E-05	1,1	0,953333	0,957332288	0,786962	1,265815042											
8	1,231	1,07	39,51193553	0,118472387	1784,938074	1550,537634	4084316,203	0,006449376	1,2899E-05	1,1	0,953333	0,957332288	0,779167	1,269290424											
8,5	1,240	1,07	39,81558901	0,117568858	1806,211855	1534,946237	4074319,234	0,006514886	1,303E-05	1,1	0,953333	0,957332288	0,771371	1,271567627											
9	1,249	1,07	40,10188113	0,11672952	1826,374869	1519,354839	4061932,476	0,006581741	1,3163E-05	1,1	0,953333	0,957332288	0,763575	1,27276804											
9,5	1,258	1,07	40,37269024	0,115946529	1845,541736	1503,763441	4047398,373	0,006649982	1,33E-05	1,1	0,953333	0,957332288	0,75578	1,272994432											
10	1,266	1,07	40,62960545	0,115213359	1863,809983	1488,172043	4030922,863	0,006719653	1,3439E-05	1,1	0,953333	0,957332288	0,747984	1,272334642											
10,5	1,273	1,07	40,87398311	0,11452452	1881,263298	1472,580645	4012682,428	0,0067908	1,3582E-05	1,1	0,953333	0,957332288	0,740188	1,270864384											
11	1,281	1,07	41,10699016	0,11387536	1897,974052	1456,989247	3992829,511	0,006863469	1,3727E-05	1,1	0,953333	0,957332288	0,732392	1,268649429											
11,5	1,288	1,07	41,32963786	0,1132619	1914,005263	1441,397849	3971496,742	0,00693771	1,3875E-05	1,1	0,953333	0,957332288	0,724597	1,265747298											
12	1,294	1,07	41,54280826	0,112680714	1929,412148	1425,806452	3948800,269	0,007013575	1,4027E-05	1,1	0,953333	0,957332288	0,716801	1,26220862											
12,5	1,301	1,07	41,74727537	0,112128834	1944,243373	1410,215054	3924842,412	0,007091117	1,4182E-05	1,1	0,953333	0,957332288	0,709005	1,258078212											
13	1,307	1,07	41,94372205	0,11160367	1958,542054	1394,623656	3899713,799	0,007170393	1,4341E-05	1,1	0,953333	0,957332288	0,70121	1,253395951											
13,5	1,313	1,07	42,13275386	0,111102952	1972,346573	1379,032258	3873495,113	0,007251462	1,4503E-05	1,1	0,953333	0,957332288	0,693414	1,248197497											
14	1,318	1,07	42,31491024	0,110624678	1985,691256	1363,44086	3846258,508	0,007334385	1,4669E-05	1,1	0,953333	0,957332288	0,685618	1,242514874											
14,5	1,324	1,07	42,49067384	0,110167077	1998,606925	1347,849462	3818068,792	0,007419226	1,4838E-05	1,1	0,953333	0,957332288	0,677823	1,236376966											
15	1,329	1,07	42,66047818	0,109728571	2011,121363	1332,258065	3788984,406	0,007506053	1,5012E-05	1,1	0,953333	0,957332288	0,670027	1,229809919											
15,5	1,334	1,07	42,82471415	0,109307754	2023,259706	1316,666667	3759058,242	0,007594937	1,519E-05	1,1	0,953333	0,957332288	0,662231	1,222837488											
16	1,339	1,07	42,9837354	0,108903362	2035,044766	1301,075269	3728338,339	0,00768595	1,5372E-05	1,1	0,953333	0,957332288	0,654435	1,215481327											
16,5	1,344	1,07	43,1378629	0,108514261	2046,497317	1285,483871	3696868,465	0,007779172	1,5558E-05	1,1	0,953333	0,957332288	0,64664	1,207761235											
17	1,349	1,07	43,28738888	0,108139424	2057,636327	1269,892473	3664688,621	0,007874682	1,5749E-05	1,1	0,953333	0,957332288	0,638844	1,199695369											
17,5	1,353	1,07	43,43258016	0,107777924	2068,479165	1254,301075	3631835,466	0,007972568	1,5945E-05	1,1	0,953333	0,957332288	0,631048	1,191300425											
18	1,357	1,07	43,57368099	0,107428916	2079,041777	1238,709677	3598342,689	0,008072917	1,6146E-05	1,1	0,953333	0,957332288	0,623253	1,182591796											



Vortex Shedding																	
Altura (m):	46,5	Ø Topo (mm):	350	St	0,18	Cc	0,02	Ø v.s. (mm)	350,0	ρ (kg/m³)	1,250	Ø (m)	0,350	oy	0,0661	ps (kg/m³)	7850,0
Discretização da altura (m):	0,5	Ø Base (mm):	1800	Ha V.S. ?	K.O.	Ka,max	2,0	δs	0,012	Sc	19,527	C2	2,820E-07	Kp	1,867	n (Hz)	0,380
Número de disc. N:	93	Jorramento (mm/m):	31,2	Re min	17240,7	aL	0,4	m <sub>s</sub> (Kg/m)	124,6	C1	0,0178	(oy/b)²	3,5697E-02	Ymax (m)	1,2346E-01	F. máx (kN)	0,033

Altura z (m)	Existência de Vortex Shedding				Força de inércia perpendicular a direção do vento devido ao V.S.							Força Concentrada V.S.	
	Ø exterior b (mm)	V <sub>crit1</sub> (m/s)	V <sub>m</sub> (z)	V <sub>crit1</sub> > 1.25 V <sub>m</sub> (z) ?	Reynolds	A secção (m²)	m(z) (Kg/m)	φ(z)	F <sub>w</sub> (z) (kN/m)	Aref (m²)	F <sub>w</sub> (z) (kN)		
0	1800	3.8	29.0965359	K.O.	456000	0.083133908	652.6011762	0	0	0	0		
0,5	1784,408602	3,7670848	29,0965359	K.O.	448134,5713	0,082407545	646,8992256	0,000116	5,26395E-05	0,896102151	4,717E-05		
1	1768,817204	3,7341697	29,0965359	K.O.	440337,5685	0,081681182	641,1972751	0,000462	0,000208702	0,888306452	0,00018539		
1,5	1753,225806	3,7012545	31,1274087	K.O.	432608,9914	0,080954818	635,4953245	0,001041	0,000465403	0,880510753	0,00040979		
2	1737,634409	3,6683393	32,5683358	K.O.	424948,8402	0,080228455	629,793374	0,00185	0,00081996	0,872715054	0,00071559		
2,5	1722,043011	3,6354241	33,6860057	K.O.	417357,1147	0,079502092	624,0914235	0,002891	0,001269589	0,864919355	0,00109809		
3	1706,451613	3,602509	34,5992085	K.O.	409833,8151	0,078775729	618,3894729	0,004162	0,001811504	0,857123656	0,00155268		
3,5	1690,860215	3,5695938	35,3713105	K.O.	402378,9413	0,078049366	612,6875224	0,005665	0,002442924	0,849327957	0,00207484		
4	1675,268817	3,5366786	36,0401357	K.O.	394992,4932	0,077323003	606,9855718	0,0074	0,003161063	0,841532258	0,00266014		
4,5	1659,677419	3,5037634	36,6300813	K.O.	387674,471	0,07659664	601,2836213	0,009365	0,003963138	0,833736559	0,00330421		
5	1644,086022	3,4708483	37,1578056	K.O.	380424,8746	0,075870277	595,5816707	0,011562	0,004846365	0,82594086	0,00400281		
5,5	1628,494624	3,4379331	37,6351903	K.O.	373243,704	0,075143913	589,8797202	0,01399	0,00580796	0,818145161	0,00475175		
6	1612,903226	3,4050179	38,0710084	K.O.	366130,9593	0,07441755	584,1777697	0,016649	0,006845139	0,810349462	0,00554695		
6,5	1597,311828	3,3721027	38,4719222	K.O.	359086,6403	0,073691187	578,4758191	0,01954	0,007955119	0,802553763	0,00638441		
7	1581,72043	3,3391876	38,8431104	K.O.	352110,7471	0,072964824	572,7738686	0,022662	0,009135115	0,794758065	0,00726021		
7,5	1566,129032	3,3062724	39,1886783	K.O.	345203,2798	0,072238461	567,071918	0,026015	0,010382344	0,786962366	0,00817051		
8	1550,537634	3,2733572	39,5119355	K.O.	338364,2382	0,071512098	561,3699675	0,029599	0,011694022	0,779166667	0,00911159		
8,5	1534,946237	3,2404421	39,8155589	K.O.	331593,6225	0,070785735	555,6680169	0,033414	0,013067365	0,771370968	0,01007979		
9	1519,354839	3,2075269	40,1018811	K.O.	324891,4325	0,070059372	549,9660664	0,037461	0,014499589	0,763575269	0,01107153		
9,5	1503,763441	3,1746117	40,3726902	K.O.	318257,6684	0,069333008	544,2641159	0,041739	0,015987909	0,75577957	0,01208334		
10	1488,172043	3,1416965	40,6296054	K.O.	311692,3301	0,068606645	538,5621653	0,046248	0,017529544	0,747983871	0,01311182		
10,5	1472,580645	3,1087814	40,8739831	K.O.	305195,4176	0,067880282	532,8602148	0,050989	0,019121707	0,740188172	0,01415366		
11	1456,989247	3,0758662	41,1069902	K.O.	298766,9309	0,067153919	527,1582642	0,05596	0,020761616	0,732392473	0,01520565		
11,5	1441,397849	3,042951	41,3296379	K.O.	292406,87	0,066427556	521,4563137	0,061163	0,022446487	0,724596774	0,01626465		
12	1425,806452	3,0100358	41,5428083	K.O.	286115,2349	0,065701193	515,7543631	0,066597	0,024173535	0,716800175	0,01732762		
12,5	1410,215054	2,9771207	41,7472754	K.O.	279892,0256	0,06497483	510,0524126	0,072263	0,025939978	0,709005376	0,01839158		
13	1394,623656	2,9442055	41,9437221	K.O.	273737,2422	0,064248467	504,350462	0,078159	0,02774303	0,701209677	0,01945368		
13,5	1379,032258	2,9112903	42,1327539	K.O.	267650,8845	0,063522103	498,6485115	0,084287	0,029579909	0,693413978	0,02051112		
14	1363,44086	2,8783751	42,3149102	K.O.	261632,9526	0,06279574	492,946561	0,090646	0,03144783	0,68561828	0,02156121		
14,5	1347,849462	2,84546	42,4906738	K.O.	255683,4466	0,062069377	487,2446104	0,097237	0,033344009	0,677822581	0,02260132		
15	1332,258065	2,8125448	42,6604782	K.O.	249802,3664	0,061343014	481,5426599	0,104058	0,035265663	0,670026882	0,02362894		
15,5	1316,666667	2,7796296	42,8247142	K.O.	243989,7119	0,060616651	475,8407093	0,111111	0,037210007	0,662231183	0,02464163		
16	1301,075269	2,7467145	42,9837354	K.O.	238245,4833	0,059890288	470,1387588	0,118395	0,039174259	0,654435484	0,02563703		
16,5	1285,483871	2,7137993	43,1378629	K.O.	232569,6805	0,059163925	464,4368082	0,125911	0,041155633	0,646639785	0,02661287		
17	1269,892473	2,6808841	43,2873889	K.O.	226962,3035	0,058437561	458,7348577	0,133657	0,043151346	0,638844086	0,02756698		
17,5	1254,301075	2,6479689	43,4325802	K.O.	221423,3523	0,057711198	453,0329072	0,141635	0,045158615	0,631048387	0,02849727		
18	1238,709677	2,6150538	43,573681	K.O.	215952,8269	0,056984835	447,3309566	0,149844	0,047174655	0,623252688	0,02940173		
18,5	1223,11828	2,5821386	43,7109156	K.O.	210550,7273	0,056258472	441,6290061	0,158284	0,049196682	0,615456989	0,03027844		
19	1207,526882	2,5492234	43,8444901	K.O.	205217,0536	0,055532109	435,9270555	0,166956	0,051221913	0,60766129	0,03112557		
19,5	1191,935484	2,5163082	43,9745948	K.O.	199951,8056	0,054805746	430,225105	0,175858	0,053247563	0,599865591	0,03194138		
20	1176,344086	2,4833931	44,1014053	K.O.	194754,9834	0,054079383	424,5231544	0,184992	0,05527085	0,592069892	0,03272421		
20,5	1160,752688	2,4504779	44,2250844	K.O.	189626,5871	0,04279817	335,9656324	0,194358	0,045955484	0,584274194	0,0268506		
21	1145,16129	2,4175627	44,345783	K.O.	184566,6166	0,042217079	331,404072	0,203954	0,047569786	0,576478495	0,02742296		
21,5	1129,569892	2,3846476	44,4636413	K.O.	179575,0718	0,041635989	326,8425115	0,213782	0,049175663	0,568682796	0,02796535		
22	1113,978495	2,3517324	44,57879	K.O.	174651,9529	0,041054898	322,2809511	0,223841	0,050770889	0,560887097	0,02847674		
22,5	1098,387097	2,3188172	44,6913509	K.O.	169797,2598	0,040473808	317,7193907	0,234131	0,052353235	0,553091398	0,02895612		
23	1082,795699	2,285902	44,8014377	K.O.	165010,9925	0,039892717	313,1578302	0,244653	0,053920476	0,545295699	0,02940026		
23,5	1067,204301	2,2529869	44,9091569	K.O.	160293,151	0,039311627	308,5962698	0,255405	0,055470383	0,5375	0,02981533		
24	1051,612903	2,2200717	45,0146081	K.O.	155643,7353	0,038730536	304,0347094	0,266389	0,05700073	0,529704301	0,03019353		
24,5	1036,021505	2,1871565	45,117885	K.O.	151062,7454	0,038149446	299,4731489	0,277604	0,058509289	0,521908602	0,0305365		
25	1020,430108	2,1542413	45,2190752	K.O.	146550,1814	0,037568355	294,9115885	0,289051	0,059993835	0,514112903	0,0308436		
25,5	1004,83871	2,1213262	45,3182616	K.O.	142106,0431	0,036987265	290,3500281	0,300728	0,061452138	0,506317204	0,03111427		
26	989,2473118	2,088411	45,4155219	K.O.	137730,3306	0,036406174	285,7884676	0,312637	0,062881973	0,498521505	0,03134802		
26,5	973,655914	2,0654958	45,5109295	K.O.	133423,044	0,035825084	281,2269072	0,324777	0,064281113	0,490725806	0,0315444		
27	958,0645161	2,0225806	45,6045537	K.O.	129184,1831	0,035243993	276,6653468	0,337149	0,065647329	0,482930108	0,03170307		
27,5	942,4731183	1,9896655	45,6964599	K.O.	125013,7481	0,034662903	272,1037863	0,349751	0,066978395	0,475134409	0,03182374		
28	926,8817204	1,9567503	45,7867101	K.O.	120911,7389	0,034081812	267,5422259	0,362585	0,068272085	0,46733871	0,03190619		
28,5	911,2903226	1,9238351	45,8753628	K.O.	116878,1555	0,033500722	262,9806655	0,37565	0,06952617	0,459543011	0,03195027		
29	895,6989247	1,89092	45,9624737	K.O.	112912,9979	0,032919631	258,419105	0,388947	0,070738424	0,451747312	0,03195589		
29,5	880,1075269	1,8580048	46,0480954	K.O.	109016,2661	0,032338541	253,8575446	0,402474	0,07190662	0,443951613	0,03192306		
30	864,516129	1,8250896	46,132278	K.O.	105187,9601	0,03175745	249,2959842	0,416233	0,07302853	0,436155914	0,03185183		
30,5	848,9247312	1,7921744	46,2150692	K.O.	101428,0799	0,026044608	204,4501694	0,430223	0,061904457	0,428360215	0,02651741		
31	833,3333333	1,7592593	46,296514	K.O.	97736,62551	0,025560365	200,648869	0,444444	0,062761725	0,420564516	0,02639535		
31,5	817,7419355	1,7263441	46,3766557	K.O.	94113,59695	0,025076123	196,8475687	0,458897	0,063574936	0,412768817	0,02624175		
32	802,1505376	1											

Ovalling																
Altura (m):	46,5	Ø Topo (mm):	350			ps (kg/m3)	7850	Módulo 1 (m   mm)	10,0	15	Módulo 4 (m   mm)	10,00	10	Módulo 7 (m   mm)	0,00	0
Discretização da altura (m):	0,5	Ø Base (mm):	1800	E (Pa)	2,1E+11	St	0,18	Módulo 2 (m   mm)	10,0	15	Módulo 5 (m   mm)	6,50	6	Módulo 8 (m   mm)	0,00	0
Número de disc. N:	93	Jorramento (mm/m):	31,2	v	0,3	Tudo O.K. ?	O.K.	Módulo 3 (m   mm)	10,0	12	Módulo 6 (m   mm)	0,00	0			

Altura z (m)	Existência de Ovalização							
	Ø exterior b (m)	μs (Kg/m³)	n1,σ (Hz)	V <sub>enU</sub> (m/s)	V <sub>m</sub> (z)	V <sub>enU</sub> > 1,25 V <sub>m</sub> (z) ?	Espessura (m)	Fator Segurança
0	1,8	117,75	12,34996	61,74978912	29,09653594	O.K.	0,015	1,70
0,5	1,784408602	117,75	12,56672	62,28933232	29,09653594	O.K.	0,015	1,71
1	1,768817204	117,75	12,78924	62,83838723	29,09653594	O.K.	0,015	1,73
1,5	1,753225806	117,75	13,01772	63,3972076	31,12740867	O.K.	0,015	1,63
2	1,737634409	117,75	13,25237	63,9660563	32,5683358	O.K.	0,015	1,57
2,5	1,722043011	117,75	13,49343	64,54520574	33,68600572	O.K.	0,015	1,53
3	1,706451613	117,75	13,74113	65,13493824	34,59920853	O.K.	0,015	1,51
3,5	1,690860215	117,75	13,99571	65,73554657	35,37131051	O.K.	0,015	1,49
4	1,675268817	117,75	14,25744	66,34733439	36,04013567	O.K.	0,015	1,47
4,5	1,659677419	117,75	14,52657	66,97061677	36,63008126	O.K.	0,015	1,46
5	1,644086022	117,75	14,8034	67,60572072	37,15780558	O.K.	0,015	1,46
5,5	1,628494624	117,75	15,08821	68,2529858	37,6351903	O.K.	0,015	1,45
6	1,612903226	117,75	15,38133	68,91276466	38,0710084	O.K.	0,015	1,45
6,5	1,597311828	117,75	15,68307	69,58542375	38,47192219	O.K.	0,015	1,45
7	1,58172043	117,75	15,99378	70,27134397	38,84311038	O.K.	0,015	1,45
7,5	1,566129032	117,75	16,31381	70,97092138	39,18867832	O.K.	0,015	1,45
8	1,550537634	117,75	16,64355	71,68456795	39,51193553	O.K.	0,015	1,45
8,5	1,534946237	117,75	16,98338	72,41271242	39,81558901	O.K.	0,015	1,45
9	1,519354839	117,75	17,33373	73,15580112	40,10188113	O.K.	0,015	1,46
9,5	1,503763441	117,75	17,69504	73,91429888	40,37269024	O.K.	0,015	1,46
10	1,488172043	117,75	18,06776	74,68869002	40,62960545	O.K.	0,015	1,47
10,5	1,472580645	117,75	18,45238	75,47947936	40,87398311	O.K.	0,015	1,48
11	1,456989247	117,75	18,84941	76,28719335	41,10699016	O.K.	0,015	1,48
11,5	1,441397849	117,75	19,2594	77,11238119	41,32963786	O.K.	0,015	1,49
12	1,425806452	117,75	19,68291	77,95561613	41,54280826	O.K.	0,015	1,50
12,5	1,410215054	117,75	20,12055	78,81749675	41,74727537	O.K.	0,015	1,51
13	1,394623656	117,75	20,57294	79,69864841	41,94372205	O.K.	0,015	1,52
13,5	1,379032258	117,75	21,04077	80,59972475	42,13275386	O.K.	0,015	1,53
14	1,363444086	117,75	21,52474	81,5214093	42,31491024	O.K.	0,015	1,54
14,5	1,347849462	117,75	22,0256	82,46441722	42,49067384	O.K.	0,015	1,55
15	1,332258065	117,75	22,54414	83,42949716	42,66047818	O.K.	0,015	1,56
15,5	1,316666667	117,75	23,08122	84,41743323	42,82471415	O.K.	0,015	1,58
16	1,301075269	117,75	23,63772	85,4290471	42,9837354	O.K.	0,015	1,59
16,5	1,285483871	117,75	24,2146	86,46520032	43,1378629	O.K.	0,015	1,60
17	1,269892473	117,75	24,81285	87,52679677	43,28738888	O.K.	0,015	1,62
17,5	1,254301075	117,75	25,43354	88,61478524	43,43258016	O.K.	0,015	1,63
18	1,238709677	117,75	26,07783	89,73016231	43,57368099	O.K.	0,015	1,65
18,5	1,22311828	117,75	26,74691	90,87397537	43,71091556	O.K.	0,015	1,66
19	1,207526882	117,75	27,44207	92,0473259	43,84449011	O.K.	0,015	1,68
19,5	1,191935484	117,75	28,16469	93,25137301	43,97459478	O.K.	0,015	1,70
20	1,176344086	117,75	28,91623	94,48733728	44,10140531	O.K.	0,015	1,71
20,5	1,160752688	94,2	23,75861	76,60520388	44,2250844	O.K.	0,012	1,39
21	1,14516129	94,2	24,40996	77,64818553	44,34578297	O.K.	0,012	1,40
21,5	1,129569892	94,2	25,08847	78,71995963	44,46364132	O.K.	0,012	1,42
22	1,113978495	94,2	25,79567	79,82173512	44,57879003	O.K.	0,012	1,43
22,5	1,098387097	94,2	26,5332	80,95478961	44,69135091	O.K.	0,012	1,45
23	1,082795699	94,2	27,30282	82,12047427	44,80143773	O.K.	0,012	1,47
23,5	1,067204301	94,2	28,10641	83,32021923	44,9091569	O.K.	0,012	1,48
24	1,051612903	94,2	28,94601	84,55553946	45,01460813	O.K.	0,012	1,50
24,5	1,036021505	94,2	29,8238	85,82804109	45,11788495	O.K.	0,012	1,52
25	1,020430108	94,2	30,74213	87,13942844	45,21907523	O.K.	0,012	1,54
25,5	1,00483871	94,2	31,70354	88,4915116	45,31826161	O.K.	0,012	1,56
26	0,989247312	94,2	32,71077	89,88621477	45,41552192	O.K.	0,012	1,58
26,5	0,973655914	94,2	33,76677	91,32558541	45,51092953	O.K.	0,012	1,61
27	0,958064516	94,2	34,87474	92,81180425	45,60455373	O.K.	0,012	1,63
27,5	0,942473118	94,2	36,03815	94,34719634	45,69645995	O.K.	0,012	1,65
28	0,92688172	94,2	37,26077	95,93424314	45,78671011	O.K.	0,012	1,68
28,5	0,911290323	94,2	38,54668	97,57559598	45,87536284	O.K.	0,012	1,70
29	0,895698925	94,2	39,90032	99,27409074	45,9624737	O.K.	0,012	1,73
29,5	0,880107527	94,2	41,32654	101,0327643	46,04809542	O.K.	0,012	1,76
30	0,864516129	94,2	42,83061	102,8548726	46,13227805	O.K.	0,012	1,78
30,5	0,848924731	78,5	37,01526	87,28659235	46,21506916	O.K.	0,01	1,51
31	0,833333333	78,5	38,41331	88,91969633	46,29651402	O.K.	0,01	1,54
31,5	0,817741935	78,5	39,89208	90,61507516	46,3766557	O.K.	0,01	1,56
32	0,802150538	78,5	41,45792	92,37636013	46,45553526	O.K.	0,01	1,59
32,5	0,78655914	78,5	43,11779	94,20747048	46,53319183	O.K.	0,01	1,62
33	0,770967742	78,5	44,87938	96,11264248	46,60966276	O.K.	0,01	1,65
33,5	0,755376344	78,5	46,75117	98,09646215	46,68498371	O.K.	0,01	1,68
34	0,739784946	78,5	48,74255	100,1639021	46,75918874	O.K.	0,01	1,71
34,5	0,724193548	78,5	50,86393	102,3203633	46,83231046	O.K.	0,01	1,75
35	0,708602151	78,5	53,12688	104,5717218	46,90438002	O.K.	0,01	1,78
35,5	0,693010753	78,5	55,54427	106,9243827	46,97542729	O.K.	0,01	1,82
36	0,677419355	78,5	58,1305	109,3853407	47,04548086	O.K.	0,01	1,86
36,5	0,661827957	78,5	60,90164	111,9622496	47,11456814	O.K.	0,01	1,90
37	0,646236559	78,5	63,87577	114,6635019	47,18271543	O.K.	0,01	1,94
37,5	0,630645161	78,5	67,07321	117,49832	47,24994796	O.K.	0,01	1,99
38	0,615053763	78,5	70,51688	120,4768613	47,31628997	O.K.	0,01	2,04
38,5	0,599462366	78,5	74,23272	123,6103402	47,38176474	O.K.	0,01	2,09
39	0,583870968	78,5	78,2502	126,9111688	47,44639465	O.K.	0,01	2,14
39,5	0,56827957	78,5	82,60287	130,3931214	47,51020122	O.K.	0,01	2,20
40	0,552688172	78,5	87,32908	134,0715266	47,57320518	O.K.	0,01	2,25
40,5	0,537096774	47,1	55,4837	82,77809569	47,63542646	O.K.	0,006	1,39
41	0,521505376	47,1	58,85087	85,25290473	47,69688426	O.K.	0,006	1,43
41,5	0,505913978	47,1	62,53413	87,88025249	47,75759711	O.K.	0,006	1,47
42	0,490322581	47,1	66,57431	90,67469034	47,81758284	O.K.	0,006	1,52
42,5	0,474731183	47,1	71,01907	93,6526813	47,87685866	O.K.	0,006	1,56
43	0,459139785	47,1	75,92427	96,83292458	47,93544118	O.K.	0,006	1,62
43,5	0,443548387	47,1	81,35579	100,2367486	47,99334643	O.K.	0,006	1,67
44	0,427956989	47,1	87,39171	103,8885899	48,05058989	O.K.	0,006	1,73
44,5	0,412365591	47,1	94,12514	107,816581	48,10718652	O.K.	0,006	1,79
45	0,396774194	47,1	101,6679	112,0532759	48,16315078	O.K.	0,006	1,86
45,5	0,381182796	47,1	110,1549	116,6365551	48,21849663	O.K.	0,006	1,94
46	0,365591398	47,1	119,7508	121,6107612	48,27323759	O.K.	0,006	2,02
46,5	0,35	47,1	130,6575	127,0281376	48,32738675	O.K.	0,006	2,10

Ação do Vento - Braços e Cabos

Altura (m):	46,5	Ø Topo (mm):	350	Geometria:	12	Ø médio (mm)	1075	$\psi\lambda$	0,8667
Discretização da altura (m):	0,5	Ø Base (mm):	1800	Raio curvatura canto (mm):	10	l/b	43,2558	CsCd	1
Número de níveis:	8	Jorramento (mm/m):	31,2	Rugosidade eq. (mm):	0,02	$\lambda$	70,0000	ps (kg/m3)	7850

Altura z (m)	Velocidade média vento (m/s)			Pressão dinâmica pico (Pa)		Coeficiente de força Cf						Coef. Estrutural CsCd	Força do Vento		Peso Próprio Braços			Forças dos Cabos		
	Cr (z)	Co	Vm (z)	Iv (z)	Op (z)	Ø médio secção (mm)	Reynolds	r/b	k/b	Cf,0	Cf	CsCd	Aref (m²)	F <sub>w</sub> (z) (kN)	Esp. (mm)	L (m)	P.P. (kN)	Ti	Li	Vi
46,5	1,5055	1,07	48,3274	0,0969	2449,440	275	886002,0904	0,036364	7,27273E-05	0,9	0,7800	1	0,550	1,051	6	2	0,771	12,86	0	-7,76
46,5	1,5055	1,07	48,3274	0,0969	2449,440	275	886002,0904	0,036364	7,27273E-05	0,9	0,7800	1	0,550	1,051	6	2	0,771	12,86	0	-7,76
42,5	1,4915	1,07	47,8769	0,0978	2413,124	350	1117126,702	0,028571	5,71429E-05	0,9	0,7800	1	1,400	2,635	8	4	2,615	50,74	0	-37,52
42,5	1,4915	1,07	47,8769	0,0978	2413,124	350	1117126,702	0,028571	5,71429E-05	0,9	0,7800	1	1,400	2,635	8	4	2,615	50,74	0	-37,52
32,5	1,4496	1,07	46,5332	0,1006	2306,322	350	1085774,476	0,028571	5,71429E-05	0,9	0,7800	1	1,400	2,519	8	4	2,615	48,58	0	-37,52
32,5	1,4496	1,07	46,5332	0,1006	2306,322	350	1085774,476	0,028571	5,71429E-05	0,9	0,7800	1	1,400	2,519	8	4	2,615	48,58	0	-37,52
22,5	1,3923	1,07	44,6914	0,1047	2163,588	350	1042798,188	0,028571	5,71429E-05	0,9	0,7800	1	1,400	2,363	8	4	2,615	46,42	0	-37,52
22,5	1,3923	1,07	44,6914	0,1047	2163,588	350	1042798,188	0,028571	5,71429E-05	0,9	0,7800	1	1,400	2,363	8	4	2,615	46,42	0	-37,52

Esforços																											
Altura (m):		46,5	Ø Topo (mm):		350	Direção Principal do Vento		Y	Majoração Peso Próprio		1,10																
Discretização da altura (m):		0,5	Ø Base (mm):		1800	Massa total do Poste (Ton)		15,890	Majoração Ação do Vento		1,40																
Número de disc. N:		93	Jorramento (mm/m):		31,2				Majoração Ação dos Cabos		1,00																
Altura z (m)	Esforço Axial Característico										Esforço Transverso na Direção X Característico								Esforço Transverso na Direção Y Característico						Momentos em Y Característicos		L Braço Esq. (m)
	m (Kg)	P (kN)	N P.P. Poste (kN)	N (kN) P.P. Braços Esq.	N (kN) P.P. Braços Dir.	Vi (kN) Cabos Esq.	Vi (kN) Cabos Dir.	P (kN) Total no Nivel	N (kN) Total	F <sub>w</sub> (z) (kN)	F <sub>w,x</sub> Braços Esq. (kN)	F <sub>w,x</sub> Braços Dir. (kN)	Li (kN) Cabos Esq.	Li (kN) Cabos Dir.	V <sub>x</sub> (kN) Total no Nivel	V <sub>x</sub> (kN) Total	F <sub>w</sub> (z) (kN)	Ti (kN) Cabos Esq.	Ti (kN) Cabos Dir.	V <sub>y</sub> (kN) Total no Nivel	V <sub>y</sub> (kN) Total	M <sub>y</sub> no Nivel (kN.m)	M <sub>y</sub> (kN.m)				
0	324,8751	3,1870247	155,8841273	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	3,19	413,8	0	0	0	0	0	0,00	0,0	0	0	0	0,00	407,1	0,00	0,0	0,00			
0,5	322,0241	3,1590567	152,6971025	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	3,16	410,6	0	0	0	0	0	0,00	0,0	0,920078	0	0	0,92	407,1	0,00	0,0	0,00			
1	319,1731	3,1310886	149,5380459	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	3,13	407,4	0	0	0	0	0	0,00	0,0	0,912074	0	0	0,91	406,1	0,00	0,0	0,00			
1,5	316,3222	3,1031205	146,4069573	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	3,10	404,3	0	0	0	0	0	0,00	0,0	0,998922	0	0	1,00	405,2	0,00	0,0	0,00			
2	313,4712	3,0751525	143,3038367	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	3,08	401,2	0	0	0	0	0	0,00	0,0	1,059271	0	0	1,06	404,2	0,00	0,0	0,00			
2,5	310,6202	3,0471844	140,2286843	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	3,05	398,1	0	0	0	0	0	0,00	0,0	1,104411	0	0	1,10	403,2	0,00	0,0	0,00			
3	307,7692	3,0192163	137,1814999	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	3,02	395,1	0	0	0	0	0	0,00	0,0	1,139574	0	0	1,14	402,1	0,00	0,0	0,00			
3,5	304,9183	2,9912483	134,1622836	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	2,99	392,0	0	0	0	0	0	0,00	0,0	1,167639	0	0	1,17	400,9	0,00	0,0	0,00			
4	302,0673	2,9632802	131,1710353	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	2,96	389,0	0	0	0	0	0	0,00	0,0	1,190368	0	0	1,19	399,8	0,00	0,0	0,00			
4,5	299,2163	2,9353121	128,2077551	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	2,94	386,1	0	0	0	0	0	0,00	0,0	1,208923	0	0	1,21	398,6	0,00	0,0	0,00			
5	296,3653	2,9073441	125,272443	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	2,91	383,1	0	0	0	0	0	0,00	0,0	1,224111	0	0	1,22	397,4	0,00	0,0	0,00			
5,5	293,5144	2,879376	122,3650989	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	2,88	380,2	0	0	0	0	0	0,00	0,0	1,236521	0	0	1,24	396,1	0,00	0,0	0,00			
6	290,6634	2,8514079	119,4857229	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	2,85	377,4	0	0	0	0	0	0,00	0,0	1,24659	0	0	1,25	394,9	0,00	0,0	0,00			
6,5	287,8124	2,8234399	116,634315	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	2,82	374,5	0	0	0	0	0	0,00	0,0	1,25466	0	0	1,25	393,7	0,00	0,0	0,00			
7	284,9614	2,7954718	113,8108751	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	2,80	371,7	0	0	0	0	0	0,00	0,0	1,260997	0	0	1,26	392,4	0,00	0,0	0,00			
7,5	282,1105	2,7675037	111,0154033	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	2,77	368,9	0	0	0	0	0	0,00	0,0	1,265815	0	0	1,27	391,1	0,00	0,0	0,00			
8	279,2595	2,7395357	108,2478996	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	2,74	366,1	0	0	0	0	0	0,00	0,0	1,26929	0	0	1,27	389,9	0,00	0,0	0,00			
8,5	276,4085	2,7115676	105,508364	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	2,71	363,4	0	0	0	0	0	0,00	0,0	1,271568	0	0	1,27	388,6	0,00	0,0	0,00			
9	273,5575	2,6835995	102,7967964	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	2,68	360,7	0	0	0	0	0	0,00	0,0	1,272768	0	0	1,27	387,3	0,00	0,0	0,00			
9,5	270,7066	2,6556315	100,1131968	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	2,66	358,0	0	0	0	0	0	0,00	0,0	1,272994	0	0	1,27	386,1	0,00	0,0	0,00			
10	267,8556	2,6276634	97,45756539	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	2,63	355,3	0	0	0	0	0	0,00	0,0	1,272335	0	0	1,27	384,8	0,00	0,0	0,00			
10,5	265,0046	2,5996953	94,829902	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	2,60	352,7	0	0	0	0	0	0,00	0,0	1,270864	0	0	1,27	383,5	0,00	0,0	0,00			
11	262,1536	2,5717273	92,23020668	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	2,57	350,1	0	0	0	0	0	0,00	0,0	1,268649	0	0	1,27	382,2	0,00	0,0	0,00			
11,5	259,3027	2,5437592	89,65847943	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	2,54	347,5	0	0	0	0	0	0,00	0,0	1,265747	0	0	1,27	381,0	0,00	0,0	0,00			
12	256,4517	2,5157911	87,11472024	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	2,52	345,0	0	0	0	0	0	0,00	0,0	1,262209	0	0	1,26	379,7	0,00	0,0	0,00			
12,5	253,6007	2,4878231	84,59892912	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	2,49	342,5	0	0	0	0	0	0,00	0,0	1,258078	0	0	1,26	378,5	0,00	0,0	0,00			
13	250,7497	2,459855	82,11110607	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	2,46	340,0	0	0	0	0	0	0,00	0,0	1,253396	0	0	1,25	377,2	0,00	0,0	0,00			
13,5	247,8988	2,4318869	79,65125109	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	2,43	337,5	0	0	0	0	0	0,00	0,0	1,248197	0	0	1,25	375,9	0,00	0,0	0,00			
14	245,0478	2,4039188	77,21936418	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	2,40	335,1	0	0	0	0	0	0,00	0,0	1,242515	0	0	1,24	374,7	0,00	0,0	0,00			
14,5	242,1968	2,3759508	74,81544533	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	2,38	332,7	0	0	0	0	0	0,00	0,0	1,236377	0	0	1,24	373,4	0,00	0,0	0,00			
15	239,3458	2,3479827</																									



Esforços

Momentos em X Característicos					Torção Característica						Esf. T.
M <sub>x</sub> Peso Braços Esq. (kN.m)	L Braço Dir. (m)	M <sub>x</sub> Peso Braços Dir. (kN.m)	M <sub>x</sub> no Nivel (kN.m)	M <sub>x</sub> (kN.m)	Li (kN) Cabos Esq.	L Braço Esq. (m)	Li (kN) Cabos Dir.	L Braço Dir. (m)	Torção no Nivel (kN.m)	Torção (kN.m)	V max. (kN)
0,00	0,00	0,00	203,533215	12568,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	449,61
0,00	0,00	0,00	203,073176	12365,3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	449,61
0,00	0,00	0,00	202,6171392	12162,3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	448,25
0,00	0,00	0,00	202,1176783	11959,6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	446,91
0,00	0,00	0,00	201,5880428	11757,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	445,43
0,00	0,00	0,00	201,0358374	11555,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	443,87
0,00	0,00	0,00	200,4660504	11354,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	442,25
0,00	0,00	0,00	199,8822307	11154,4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	440,57
0,00	0,00	0,00	199,2870465	10954,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	438,85
0,00	0,00	0,00	198,682585	10755,3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	437,09
0,00	0,00	0,00	198,0705293	10556,6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	435,31
0,00	0,00	0,00	197,452269	10358,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	433,51
0,00	0,00	0,00	196,8289739	10161,1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	431,69
0,00	0,00	0,00	196,201644	9964,2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	429,85
0,00	0,00	0,00	195,5711457	9768,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	428,00
0,00	0,00	0,00	194,9382382	9572,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	426,14
0,00	0,00	0,00	194,303593	9377,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	424,28
0,00	0,00	0,00	193,6678092	9183,2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	422,41
0,00	0,00	0,00	193,0314251	8989,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	420,53
0,00	0,00	0,00	192,3949279	8796,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	418,66
0,00	0,00	0,00	191,7587606	8604,1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	416,78
0,00	0,00	0,00	191,1233284	8412,4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	414,91
0,00	0,00	0,00	190,4890037	8221,2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	413,04
0,00	0,00	0,00	189,8561301	8030,7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	411,17
0,00	0,00	0,00	189,2250257	7840,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	409,30
0,00	0,00	0,00	188,5959866	7651,7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	407,44
0,00	0,00	0,00	187,9692887	7463,1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	405,59
0,00	0,00	0,00	187,3451899	7275,1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	403,74
0,00	0,00	0,00	186,7239325	7087,8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	401,90
0,00	0,00	0,00	186,105744	6901,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	400,07
0,00	0,00	0,00	185,490839	6714,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	398,25
0,00	0,00	0,00	184,8794203	6529,4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	396,44
0,00	0,00	0,00	184,2716796	6344,6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	394,64
0,00	0,00	0,00	183,667799	6160,3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	392,85
0,00	0,00	0,00	183,0679513	5976,6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	391,07
0,00	0,00	0,00	182,4723011	5793,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	389,30
0,00	0,00	0,00	181,8810052	5611,1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	387,54
0,00	0,00	0,00	181,2942134	5429,2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	385,80
0,00	0,00	0,00	180,7120687	5247,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	384,07
0,00	0,00	0,00	180,1347082	5067,2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	382,36
0,00	0,00	0,00	179,5622634	4887,1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	380,66
0,00	0,00	0,00	178,9948601	4707,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	378,97
0,00	0,00	0,00	178,4326194	4528,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	377,30
0,00	0,00	0,00	177,875658	4350,1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	375,64
0,00	0,00	0,00	177,3240878	4172,2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	374,00
5,23	4,00	-5,23	130,3548694	3994,9	0,00	4,00	0,00	4,00	0,00	0,00	372,37
0,00	0,00	0,00	129,8144021	3864,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	277,92
0,00	0,00	0,00	129,2796389	3734,7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	276,33
0,00	0,00	0,00	128,7506772	3605,4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	274,75
0,00	0,00	0,00	128,2276109	3476,7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	273,19
0,00	0,00	0,00	127,7105311	3348,4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	271,65
0,00	0,00	0,00	127,1995258	3220,7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	270,13
0,00	0,00	0,00	126,6946806	3093,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	268,62
0,00	0,00	0,00	126,1960783	2966,8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	267,13
0,00	0,00	0,00	125,7037993	2840,6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	265,66
0,00	0,00	0,00	125,2179217	2714,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	264,21
0,00	0,00	0,00	124,7385215	2589,7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	262,78
0,00	0,00	0,00	124,2656724	2465,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	261,37
0,00	0,00	0,00	123,7994462	2340,7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	259,98
0,00	0,00	0,00	123,3399129	2216,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	258,60
0,00	0,00	0,00	122,8871404	2093,6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	257,25
0,00	0,00	0,00	122,4411951	1970,7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	255,91
0,00	0,00	0,00	122,0021417	1848,2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	254,60
0,00	0,00	0,00	121,5700432	1726,2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	253,31
0,00	0,00	0,00	121,1449612	1604,7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	252,03
5,23	4,00	-5,23	72,14633945	1483,5	0,00	4,00	0,00	4,00	0,00	0,00	250,78
0,00	0,00	0,00	71,73546923	1411,4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	152,39
0,00	0,00	0,00	71,33179156	1339,6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	151,18
0,00	0,00	0,00	70,93536248	1268,3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	149,99
0,00	0,00	0,00	70,5462368	1197,4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	148,82
0,00	0,00	0,00	70,16446809	1126,8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	147,67
0,00	0,00	0,00	69,79010883	1056,7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	146,55
0,00	0,00	0,00	69,42321034	986,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	145,44
0,00	0,00	0,00	69,06382291	917,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	144,36
0,00	0,00	0,00	68,71199578	848,4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	143,30
0,00	0,00	0,00	68,36777722	779,7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	142,27
0,00	0,00	0,00	68,03121452	711,3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	141,25
0,00	0,00	0,00	67,70235407	643,3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	140,26
0,00	0,00	0,00	67,38124135	575,6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	139,29
0,00	0,00	0,00	67,06792099	508,2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	138,35
0,00	0,00	0,00	66,76243679	441,1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	137,42
0,00	0,00	0,00	66,46483174	374,4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	136,52
0,00	0,00	0,00	66,17514804	307,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	135,64
0,00	0,00	0,00	65,89342714	241,7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	134,79
0,00	0,00	0,00	65,61970979	175,8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	133,96
5,23	4,00	-5,23	14,61595088	110,2	0,00	4,00	0,00	4,00	0,00	0,00	133,15
0,00	0,00	0,00	14,35835996	95,6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	30,90
0,00	0,00	0,00	14,10889058	81,2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	30,14
0,00	0,00	0,00	13,86758078	67,1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	29,40
0,00	0,00	0,00	13,63446795	53,3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	28,69
0,00	0,00	0,00	13,40958886	39,6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	28,00
0,00	0,00	0,00	13,19297973	26,2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	27,34
0,00	0,00	0,00	13,02254954	13,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	26,70
0,77	2,00	-0,77	0	0,0	0,00	2,00	0,00	2,00	0,00	0,00	26,20

Esforço Axial Cálculo		Esforço Transverso X Cálculo		Esforço Transverso Y Cálculo		Momentos X Cálculo		Momentos Y Cálculo		Torção Cálculo	
P (kN) Total no Nivel	Ned (kN) Total	Ved <sub>x</sub> (kN) Total no Nivel	Ved <sub>y</sub> (kN) Total	Ved <sub>y</sub> (kN) Total no Nivel	Ved <sub>x</sub> (kN) Total	Med <sub>y</sub> no Nivel (kN.m)	Medx no Nivel (kN.m)	Med <sub>y</sub> no Nivel (kN.m)	Med <sub>x</sub> (kN.m)	Torção no Nivel (kN.m)	Ted (kN.m)
3,5057	431,1	0,0000	0,0	0,0000	449,6	224,8028	13427,3	0,00	0,0	0,0000	0,0
3,475											

Secção Resistente 12 Lados - Nrd e Vpl,T,rd

Altura (m):	46,5	Ø vértices ext (mm):	1800,0	Geometria:	12	Sx (mm3)	0,0	ly (mm4)	21259992506,332	Nrd bruto (kN)	30570,86	Ø tang. faces ext (mm)	1738,666
Discret. da altura (m):	0,5	Ø vértices médio (mm):	1789,6	Espessura (mm)	10,0	Sy (mm3)	0,0	ε	0,653661019		0,00	Ø tang. faces med (mm)	1728,67
Número de disc. N:	93	Ø vértices int (mm):	1779,3	Área secção (mm2)	55583,4	Ix (mm4)	21259992506,3	fy (MPa9	550,0		0,00	Ø tang. faces int (mm)	1718,67

Diâmetro exterior

Ø vértices ext. (mm)	1800,0	Alfa (°)	30	Xi + (mm)	Yi + (mm)								
Vértices	15	Xi (mm)	Yi (mm)										
1	-15,00	869,33	-232,94	1769,33	667,06								
2	-45,00	636,40	-636,40	1536,40	263,60								
3	-75,00	232,94	-869,33	1132,94	30,67								
4	-105,00	-232,94	-869,33	667,06	30,67								
5	-135,00	-636,40	-636,40	263,60	263,60								
6	-165,00	-869,33	-232,94	30,67	667,06								
7	-195,00	-869,33	232,94	30,67	1132,94								
8	-225,00	-636,40	636,40	263,60	1536,40								
9	-255,00	-232,94	869,33	667,06	1769,33								
10	-285,00	232,94	869,33	1132,94	1769,33								
11	-315,00	636,40	636,40	1536,40	1536,40								
12	-345,00	869,33	232,94	1769,33	1132,94								
13	-375,00	869,33	-232,94	1769,33	667,06								

Área cheia (mm2)		Ix (mm4)	Iy (mm4)	Sx (mm3)	Sy (mm3)
1	101250,00	7750007631,01	-58762477106,97	-3343082,62	-14634721,02
2	303750,00	58762477106,97	-7750007631,01	-14634721,02	-3343082,62
3	405000,00	102024938951,91	0,00	-22004997,73	0,00
4	303750,00	58762477106,97	-7750007631,01	-14634721,02	3343082,62
5	101250,00	7750007631,01	-58762477106,97	-3343082,62	14634721,02
6	0,00	0,00	-102024938951,91	0,00	22004997,73
7	101250,00	7750007631,01	-58762477106,97	3343082,62	14634721,02
8	303750,00	58762477106,97	-7750007631,01	14634721,02	3343082,62
9	405000,00	102024938951,91	0,00	22004997,73	0,00
10	303750,00	58762477106,97	-7750007631,01	14634721,02	-3343082,62
11	101250,00	7750007631,01	-58762477106,97	3343082,62	-14634721,02
12	0,00	0,00	-102024938951,91	0,00	-22004997,73
Total (mm2)	2430000,00	470099816855,74	470099816855,74	0,00	0,00

Diâmetro médio

Ø vértices médios (mm)	1789,6	Alfa (°)	30	Xi + (mm)	Yi + (mm)	σ esf. (MPa)	N. máx resistente (kN)			ψ	K <sub>σ</sub>	b (mm)
Vértices	15	Xi (mm)	Yi (mm)									
1	-15,00	864,33	-231,60	1759,16	663,23	550,00	30570,86			1	4	463,1947893
2	-45,00	632,74	-632,74	1527,56	262,09	550,00	30570,86			1	4	463,1947893
3	-75,00	231,60	-864,33	1126,42	30,49	550,00	30570,86			1	4	463,1947893
4	-105,00	-231,60	-864,33	663,23	30,49	550,00	30570,86			1	4	463,1947893
5	-135,00	-632,74	-632,74	262,09	262,09	550,00	30570,86			1	4	463,1947893
6	-165,00	-864,33	-231,60	30,49	663,23	550,00	30570,86			1	4	463,1947893
7	-195,00	-864,33	231,60	30,49	1126,42	550,00	30570,86			1	4	463,1947893
8	-225,00	-632,74	632,74	262,09	1527,56	550,00	30570,86			1	4	463,1947893
9	-255,00	-231,60	864,33	663,23	1759,16	550,00	30570,86			1	4	463,1947893
10	-285,00	231,60	864,33	1126,42	1759,16	550,00	30570,86			1	4	463,1947893
11	-315,00	632,74	632,74	1527,56	1527,56	550,00	30570,86			1	4	463,1947893
12	-345,00	864,33	231,60	1759,16	1126,42	550,00	30570,86			1	4	463,1947893
13	-375,00	864,33	-231,60	1759,16	663,23	550,00	30570,86			1	4	463,1947893

Diâmetro interno

Ø vértices int. (mm)	1779,3	Alfa (°)	30	Xi + (mm)	Yi + (mm)		Área cheia (mm2)	Ix (mm4)	Iy (mm4)	Sx (mm3)	Sy (mm3)	
Vértices	15	Xi (mm)	Yi (mm)									
1	-15,00	859,33	-230,26	1748,98	659,39		1	98934,03	7399518015,29	-56104978043,68	-3229037,48	-14135475,56
2	-45,00	629,08	-629,08	1518,72	260,57		2	296802,08	56104978043,68	-7399518015,29	-14135475,56	-3229037,48
3	-75,00	230,26	-859,33	1119,90	30,31		3	395736,10	97410920056,77	0,00	-21254324,38	0,00
4	-105,00	-230,26	-859,33	659,39	30,31		4	296802,08	56104978043,68	-7399518015,29	-14135475,56	3229037,48
5	-135,00	-629,08	-629,08	260,57	260,57		5	98934,03	7399518015,29	-56104978043,68	-3229037,48	14135475,56
6	-165,00	-859,33	-230,26	30,31	659,39		6	0,00	0,00	-97410920056,77	0,00	21254324,38
7	-195,00	-859,33	230,26	30,31	1119,90		7	98934,03	7399518015,29	-56104978043,68	3229037,48	14135475,56
8	-225,00	-629,08	629,08	260,57	1518,72		8	296802,08	56104978043,68	-7399518015,29	14135475,56	3229037,48
9	-255,00	-230,26	859,33	659,39	1748,98		9	395736,10	97410920056,77	0,00	21254324,38	0,00
10	-285,00	230,26	859,33	1119,90	1748,98		10	296802,08	56104978043,68	-7399518015,29	14135475,56	-3229037,48
11	-315,00	629,08	629,08	1518,72	1518,72		11	98934,03	7399518015,29	-56104978043,68	3229037,48	-14135475,56
12	-345,00	859,33	230,26	1748,98	1119,90		12	0,00	0,00	-97410920056,77	0,00	-21254324,38
13	-375,00	859,33	-230,26	1748,98	659,39		Total	2374416,63	448839824349,41	448839824349,41	0,00	0,00

Secção Resistente 12 Lados - Nrd e Vpl,T,rd

1800,000	A. Efe. (mm2)	36696,8	Ted (kN.m)	0,00
1789,647	Nrd (kN)	20183,24	Vpl,T,rd (kN)	10978,51
1779,294			Encurvadura	O.K.

--

--

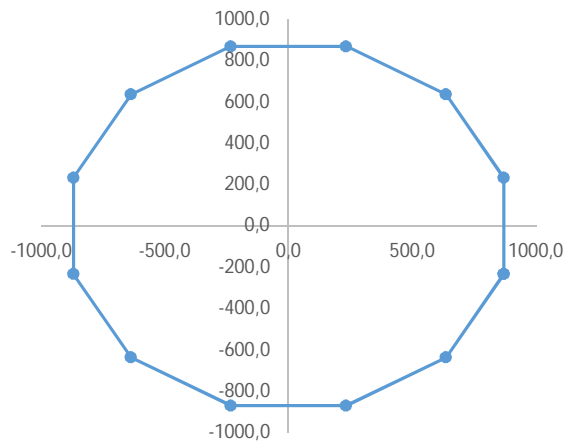
b/t	λp	ρ	O.K. ?	Beff	Be1	Be2	Soma	L Buraco	β	x1'	x1''	x2'	x2''	y1'	y1''	y2'	y2''	B tracção	Área buraco (mm2)	Área face (m2)	Âng. da face	Av face (m2)	Vpl,rd (kN)	A. Inscrita (m2)	Wt (m3)	ρ Vpl,rd
46,3195	1,2476	0,6602	O.K.	305,81	152,90	152,90	O.K.	157,4	-15	792,21	783,55	713,52	704,86	-366,52	-361,52	-502,82	-497,82	0	1573,881225	0,00463195	60,00	0,002315974	10978,51	0,10008866	48,042559	1,00000
46,3195	1,2476	0,6602	O.K.	305,81	152,90	152,90	O.K.	157,4	-45	502,82	497,82	366,52	361,52	-713,52	-704,86	-792,21	-783,55	0	1573,881225	0,00463195	30,00	0,004011385		0,30026599		
46,3195	1,2476	0,6602	O.K.	305,81	152,90	152,90	O.K.	157,4	-75	78,69	78,69	-78,69	-78,69	-869,33	-859,33	-869,33	-859,33	0	1573,881225	0,00463195	0,00	0,004631948		0,40035465		
46,3195	1,2476	0,6602	O.K.	305,81	152,90	152,90	O.K.	157,4	-105	-366,52	-361,52	-502,82	-497,82	-792,21	-783,55	-713,52	-704,86	0	1573,881225	0,00463195	30,00	0,004011385		0,30026599	Vpl,T,rd (kN)	
46,3195	1,2476	0,6602	O.K.	305,81	152,90	152,90	O.K.	157,4	-135	-713,52	-704,86	-792,21	-783,55	-502,82	-497,82	-366,52	-361,52	0	1573,881225	0,00463195	60,00	0,002315974		0,10008866	10978,51180	
46,3195	1,2476	0,6602	O.K.	305,81	152,90	152,90	O.K.	157,4	-165	-869,33	-859,33	-869,33	-859,33	-78,69	-78,69	78,69	78,69	0	1573,881225	0,00463195	90,00	0,000000000		0,000000000		
46,3195	1,2476	0,6602	O.K.	305,81	152,90	152,90	O.K.	157,4	-195	-792,21	-783,55	-713,52	-704,86	366,52	361,52	502,82	497,82	0	1573,881225	0,00463195	120,00	0,002315974		0,10008866	0,00	Encurvadura?
46,3195	1,2476	0,6602	O.K.	305,81	152,90	152,90	O.K.	157,4	-225	-502,82	-497,82	-366,52	-361,52	713,52	704,86	792,21	783,55	0	1573,881225	0,00463195	150,00	0,004011385		0,30026599		
46,3195	1,2476	0,6602	O.K.	305,81	152,90	152,90	O.K.	157,4	-255	-78,69	-78,69	78,69	78,69	869,33	859,33	869,33	859,33	0	1573,881225	0,00463195	180,00	0,004631948		0,40035465		
46,3195	1,2476	0,6602	O.K.	305,81	152,90	152,90	O.K.	157,4	-285	366,52	361,52	502,82	497,82	792,21	783,55	713,52	704,86	0	1573,881225	0,00463195	210,00	0,004011385		0,30026599		
46,3195	1,2476	0,6602	O.K.	305,81	152,90	152,90	O.K.	157,4	-315	713,52	704,86	792,21	783,55	502,82	497,82	366,52	361,52	0	1573,881225	0,00463195	240,00	0,002315974		0,10008866		
46,3195	1,2476	0,6602	O.K.	305,81	152,90	152,90	O.K.	157,4	-345	869,33	859,33	869,33	859,33	78,69	78,69	-78,69	-78,69	0	1573,881225	0,00463195	270,00	0,000000000		0,000000000		
									-375									Total=	18886,5747	0,05558337		0,03457333		2,402128		

--

Seção Resistente 12 Lados - Mrd

Altura (m):	46,5	Ø vértices ext (mm):	1800,0	Geometria:	12	Sx (mm3)	0,0	Iy (mm4)	21259992506,332	W bruto (mm3)	24596985,78	Ø tang. faces ext (mm)	1738,666
Discretização da altura (m):	0,5	Ø vértices médio (mm):	1789,6	Espessura (mm)	10,0	Sy (mm3)	0,0	ε	0,653661019	Mx (kN.m)	13528,34	Ø tang. faces med (mm)	1728,67
Número de disc. N:	93	Ø vértices int (mm):	1779,3	Área secção (mm2)	55583,4	Ix (mm4)	21259992506,3	fy (MPa)	550,0	Braço máximo	864,33	Ø tang. faces int (mm)	1718,67

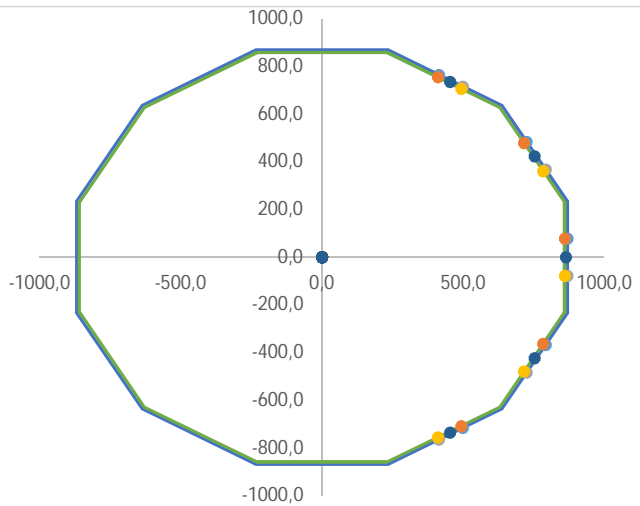
Ø vértices ext. (mm)	1800,0	Alfa (°)	30	Xi + (mm)	Yi + (mm)
Vértices	15	Xi (mm)	Yi (mm)		
1	-15,00	869,33	-232,94	1769,33	667,06
2	-45,00	636,40	-636,40	1536,40	263,60
3	-75,00	232,94	-869,33	1132,94	30,67
4	-105,00	-232,94	-869,33	667,06	30,67
5	-135,00	-636,40	-636,40	263,60	263,60
6	-165,00	-869,33	-232,94	30,67	667,06
7	-195,00	-869,33	232,94	30,67	1132,94
8	-225,00	-636,40	636,40	263,60	1536,40
9	-255,00	-232,94	869,33	667,06	1769,33
10	-285,00	232,94	869,33	1132,94	1769,33
11	-315,00	636,40	636,40	1536,40	1536,40
12	-345,00	869,33	232,94	1769,33	1132,94
13	-375,00	869,33	-232,94	1769,33	667,06



Área cheia (mm2)		Ix (mm4)	Iy (mm4)	Sx (mm3)	Sy (mm3)
1	101250,00	7750007631,01	-58762477106,97	-3343082,62	-14634721,02
2	303750,00	58762477106,97	-7750007631,01	-14634721,02	-3343082,62
3	405000,00	102024938951,91	0,00	-22004997,73	0,00
4	303750,00	58762477106,97	-7750007631,01	-14634721,02	3343082,62
5	101250,00	7750007631,01	-58762477106,97	-3343082,62	14634721,02
6	0,00	0,00	-102024938951,91	0,00	22004997,73
7	101250,00	7750007631,01	-58762477106,97	3343082,62	14634721,02
8	303750,00	58762477106,97	-7750007631,01	14634721,02	3343082,62
9	405000,00	102024938951,91	0,00	22004997,73	0,00
10	303750,00	58762477106,97	-7750007631,01	14634721,02	-3343082,62
11	101250,00	7750007631,01	-58762477106,97	3343082,62	-14634721,02
12	0,00	0,00	-102024938951,91	0,00	-22004997,73
Total (mm2)	2430000,00	470099816855,74	470099816856	0,000	0,000

## Diâmetro médio

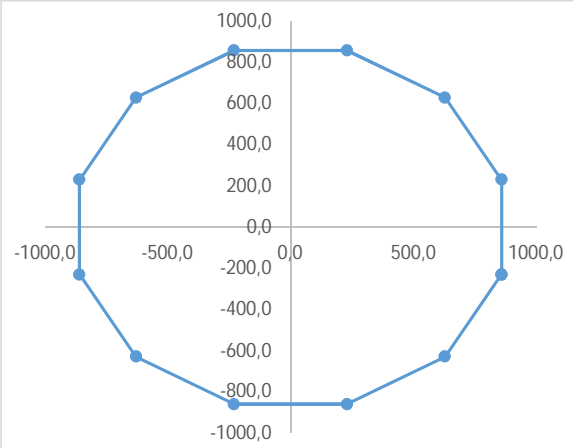
Ø vértices médios (mm)	1789,6	Alfa (°)	30	Xi + (mm)	Yi + (mm)	σ esf. (MPa)	M.máx resistente (kN.m)	M.máx Módulo
Vértices	15	Xi (mm)	Yi (mm)					
1	-15,00	864,33	-231,60	1759,16	663,23	550,00	13528,34	13528,34
2	-45,00	632,74	-632,74	1527,56	262,09	402,63	18480,06	18480,06
3	-75,00	231,60	-864,33	1126,42	30,49	147,37	50488,46	50488,46
4	-105,00	-231,60	-864,33	663,23	30,49	-147,37	-50488,46	50488,46
5	-135,00	-632,74	-632,74	262,09	262,09	-402,63	-18480,06	18480,06
6	-165,00	-864,33	-231,60	30,49	663,23	-550,00	-13528,34	13528,34
7	-195,00	-864,33	231,60	30,49	1126,42	-550,00	-13528,34	13528,34
8	-225,00	-632,74	632,74	262,09	1527,56	-402,63	-18480,06	18480,06
9	-255,00	-231,60	864,33	663,23	1759,16	-147,37	-50488,46	50488,46
10	-285,00	231,60	864,33	1126,42	1759,16	147,37	50488,46	50488,46
11	-315,00	632,74	632,74	1527,56	1527,56	402,63	18480,06	18480,06
12	-345,00	864,33	231,60	1759,16	1126,42	550,00	13528,34	13528,34
13	-375,00	864,33	-231,60	1759,16	663,23	550,00	13528,34	13528,34



$\psi$	$K_{\psi}$	b (mm)
0,73	4,601440074	463,1947893
0,37	5,790856561	463,1947893
-1,00	23,92	463,1947893
Tracção	Tracção	463,1947893
Tracção	Tracção	463,1947893
Tracção	Tracção	463,1947893
Tracção	Tracção	463,1947893
Tracção	Tracção	463,1947893
-1,00	23,92	463,1947893
0,37	5,790856561	463,1947893
0,73	4,601440074	463,1947893
1,00	4	463,1947893

## Diâmetro interno

Ø vértices int. (mm)	1779,3	Alfa (°)	30	Xi + (mm)	Yi + (mm)
Vértices	15	Xi (mm)	Yi (mm)		
1	-15,00	859,33	-230,26	1748,98	659,39
2	-45,00	629,08	-629,08	1518,72	260,57
3	-75,00	230,26	-859,33	1119,90	30,31
4	-105,00	-230,26	-859,33	659,39	30,31
5	-135,00	-629,08	-629,08	260,57	260,57
6	-165,00	-859,33	-230,26	30,31	659,39
7	-195,00	-859,33	230,26	30,31	1119,90
8	-225,00	-629,08	629,08	260,57	1518,72
9	-255,00	-230,26	859,33	659,39	1748,98
10	-285,00	230,26	859,33	1119,90	1748,98
11	-315,00	629,08	629,08	1518,72	1518,72
12	-345,00	859,33	230,26	1748,98	1119,90
13	-375,00	859,33	-230,26	1748,98	659,39



Área cheia (mm2)		Ix (mm4)	Iy (mm4)	Sx (mm3)	Sy (mm3)
1	98934,03	7399518015,29	-56104978043,68	-3229037,48	-14135475,56
2	296802,08	56104978043,68	-7399518015,29	-14135475,56	-3229037,48
3	395736,10	97410920056,77	0,00	-21254324,38	0,00
4	296802,08	56104978043,68	-7399518015,29	-14135475,56	3229037,48
5	98934,03	7399518015,29	-56104978043,68	-3229037,48	14135475,56
6	0,00	0,00	-97410920056,77	0,00	21254324,38
7	98934,03	7399518015,29	-56104978043,68	3229037,48	14135475,56
8	296802,08	56104978043,68	-7399518015,29	14135475,56	3229037,48
9	395736,10	97410920056,77	0,00	21254324,38	0,00
10	296802,08	56104978043,68	-7399518015,29	14135475,56	-3229037,48
11	98934,03	7399518015,29	-56104978043,68	3229037,48	-14135475,56
12	0,00	0,00	-97410920056,77	0,00	-21254324,38
Total	2374416,63	448839824349,41	448839824349,41	0,00	0,00

Secção Resistente 12 Lados - Mrd

1800,000	C.G.x buracos (mm)	688,75	Wy eff (mm3)	18698066,72
1789,647	C.G.x peça eff (mm)	86,53	Braço máximo (mm)	950,86
1779,294	Iy eff c.g. (mm4)	17779245637	Mrd eff (kN.m)	10283,94

--

--

b/t	λp	ρ	O.K. ?	Beff	Be1	Be2	Soma	L Buraco	β	x1'	x1''	x2'	x2''	y1'	y1''	y2'	y2''	bt	Xc.g buraco	Yc.g buraco	Área buraco (mm2)	
46,3194789	1,163177127	0,708002782	O.K.	327,9431995	153,6772	174,266	O.K.	135,3	-15	791,8248	783,1645	724,1990	715,5387	-367,1857	-362,1857	-484,3170	-479,3170	0	753,68	-423,25	1352,52	
46,3194789	1,036862899	0,792245973	O.K.	366,9642066	158,3799	208,5843	O.K.	96,2	-45	498,0748	493,0748	414,7367	409,7367	-716,2559	-707,5957	-764,3712	-755,7110	0	453,91	-735,98	962,31	
46,3194789	0,510166751	1	O.K.	0	0	0	O.K.	0,0	-75	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	231,5974	0,00	0,00	0,00	
46,3194789	Tracção	Tracção	Tracção	0	Tracção	Tracção	Tracção	0,0	-105	Tracção	Tracção	Tracção	Tracção	Tracção	Tracção	Tracção	Tracção	Tracção	0,00	0,00	0,00	
46,3194789	Tracção	Tracção	Tracção	0	Tracção	Tracção	Tracção	0,0	-135	Tracção	Tracção	Tracção	Tracção	Tracção	Tracção	Tracção	Tracção	Tracção	0,00	0,00	0,00	
46,3194789	Tracção	Tracção	Tracção	0	Tracção	Tracção	Tracção	0,0	-165	Tracção	Tracção	Tracção	Tracção	Tracção	Tracção	Tracção	Tracção	Tracção	0,00	0,00	0,00	
46,3194789	Tracção	Tracção	Tracção	0	Tracção	Tracção	Tracção	0,0	-195	Tracção	Tracção	Tracção	Tracção	Tracção	Tracção	Tracção	Tracção	Tracção	0,00	0,00	0,00	
46,3194789	Tracção	Tracção	Tracção	0	Tracção	Tracção	Tracção	0,0	-225	Tracção	Tracção	Tracção	Tracção	Tracção	Tracção	Tracção	Tracção	Tracção	0,00	0,00	0,00	
46,3194789	0,510166751	1	O.K.	0	0	0	O.K.	0,0	-255	0	0	0	0	0	0	0	0	231,5974	0,00	0,00	0,00	
46,3194789	1,036862899	0,792245973	O.K.	366,9642066	158,3799	208,5843	O.K.	96,2	-285	414,7367	409,7367	498,0748	493,0748	764,3712	755,711	716,2559	707,5957	0	453,91	735,98	962,31	
46,3194789	1,163177127	0,708002782	O.K.	327,9431995	153,6772	174,266	O.K.	135,3	-315	724,199	715,5387	791,8248	783,1645	484,317	479,317	367,1857	362,1857	0	753,68	423,25	1352,52	
46,3194789	1,247563738	0,660211803	O.K.	305,8066668	152,9033	152,9033	O.K.	157,4	-345	869,3332	859,3332	869,3332	859,3332	78,69406	78,69406	-78,6941	-78,6941	0	864,33	0,00	1573,88	
									-375											Total=		6203,525

--

Secção Resistente 12 Lados - Mrd

--

Sy (mm3)	Ângulo do buraco	Iy sob centroide buraco (mm4)	Inércia horz. (mm4)	Inércia vert. (mm4)	Iy Geral (mm4)	Iy c.g. (mm4)
1019366,56	60	515449,233	2061796,9338	11270,96581	768793425,41	955324745,31
436796,17	30	556954,046	742605,3947	8019,21522	198821255,76	281615141,46
0,00	0	0,000	0,0000	0,00000	0,00	0,00
0,00	30	0,000	0,0000	0,00000	0,00	0,00
0,00	60	0,000	0,0000	0,00000	0,00	0,00
0,00	90	0,000	0,0000	0,00000	0,00	0,00
0,00	120	0,000	0,0000	0,00000	0,00	0,00
0,00	150	0,000	0,0000	0,00000	0,00	0,00
0,00	180	0,000	0,0000	0,00000	0,00	0,00
436796,17	210	556954,046	742605,3947	8019,21522	198821255,76	281615141,46
1019366,56	240	515449,233	2061796,9338	11270,96581	768793425,41	955324745,31
1360357,86	270	13115,677	3248887,0854	13115,67687	1175815640,95	1423014113,81
4272683,31		2157922,236			3111045003,298	3896893887,36

--

Coordenadas para a ilustração							
x1'	x1''	x2'	x2''	y1'	y1''	y2'	y2''
791,8248	783,1645	724,199	715,5387	-367,186	-362,186	-484,317	-479,317
498,0748	493,0748	414,7367	409,7367	-716,256	-707,596	-764,371	-755,711
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
414,7367	409,7367	498,0748	493,0748	764,3712	755,711	716,2559	707,5957
724,199	715,5387	791,8248	783,1645	484,317	479,317	367,1857	362,1857
869,3332	859,3332	869,3332	859,3332	78,69406	78,69406	-78,6941	-78,6941



Características Resistentes das Seções Transversais

Altura (m)	46,5	Ø Topo (mm)	350	Geometria:	12	Interação M-V	O.K.	Módulo 1 (m/nm)	10,0	15	Módulo 5 (m/nm)	10,00	10	Módulo 7 (m/nm)	0,00	0	Ved <= Vrd														
Discretização da altura (m):	0,5	Ø Base (mm)	1800	Módulo 2 (m/nm)	10,0	fy (MPa)	550,0	Módulo 2 (m/nm)	10,0	15	Módulo 6 (m/nm)	6,50	6	Módulo 8 (m/nm)	0,00	0															
Número de dís. N:	93	Lorramento (mm/mm)	31,2			Encurvadura por Ved EN 1993-1-5	O.K.	Módulo 3 (m/nm)	10,0	12	Módulo 4 (m/nm)	0,00	0	Redução p	O.K.		O.K.														
Características da Seção																															
Altura z (m)	Características			Seção Bruta				Seção Efectiva				Classe da seção		Nrd (kN)		% redução		Mrd (kN.m)		% redução		Resistências da Seção a Considerar no Cálculo									
	Ø exterior (mm)	Espessura (mm)	Área bruta (m²)	W bruto (m³)	Nrd seção bruta (kN)	Mrd seção bruta (kN.m)	Área efectiva (m²)	W efectiva (m³)	Nrd eff (kN)	Mrd eff (kN.m)	Classe da seção	Nrd (kN)	% redução	Mrd (kN.m)	% redução	Ted (kN.m)	Vpl 1.rd (kN)	Enfartamento Vrd	Ved máx (kN)	Fator redutivo interação	Redução?	fy reduzido (MPa)	Mrd seção bruta (kN.m)	Mrd eff (kN.m)	Mrd seção bruta (kN.m)	Mrd eff (kN.m)	Mrd seção bruta (kN.m)	Mrd eff (kN.m)	Ved OK?		
0	1800	15	0.0013391	0.03668390	45723.65	20176.15	0.073652504	0.034928877	40508.63	19210.88219	Classe 4	40508.63	11.41	19210.88	4.78	0	16420.3628	O.K.	449.61	0.89347	O.K.	Não há redução	20176.15	19210.88	20176.15	19210.88	16420.14	40508.63	O.K.		
0,5	1784.408602	15	0.08240754	0.03604572	45324.15	19825.15	0.073417653	0.034411131	40379.71	18942.62199	Classe 4	40379.71	10.91	18942.62	4.48	0	16276.69177	O.K.	449.61	0.89526	O.K.	Não há redução	19825.15	18942.62	19825.15	18942.62	16276.67	40379.71	O.K.		
1	1768.817204	15	0.08168118	0.03541313	44924.65	19477.22	0.073179082	0.033955378	40248.50	18675.45206	Classe 4	40248.50	10.41	18675.46	4.12	0	16133.20206	O.K.	448.25	0.89195	O.K.	Não há redução	19477.22	18675.46	19477.22	18675.46	16133.20	40248.50	O.K.		
1,5	1753.258904	15	0.08071589	0.03471832	44509.38	19152.38	0.072891382	0.033498138	39978.94	18349.38813	Classe 4	39978.94	9.91	18349.39	3.84	0	15989.73498	O.K.	446.91	0.88939	O.K.	Não há redução	19152.38	18349.39	19152.38	18349.39	15989.74	39978.94	O.K.		
2	1737.634409	15	0.08022466	0.03416717	44125.65	18790.22	0.072688952	0.032989852	39978.94	18144.41842	Classe 4	39978.94	9.40	18144.42	3.44	0	15846.26784	O.K.	445.25	0.89072	O.K.	Não há redução	18790.22	18144.42	18790.22	18144.42	15846.27	39978.94	O.K.		
2,5	1727.043011	15	0.07950209	0.03354898	43726.15	18451.94	0.072432134	0.03251008	39840.47	17880.5439	Classe 4	39840.47	8.89	17880.54	3.10	0	15702.80073	O.K.	443.87	0.89013	O.K.	Não há redução	18451.94	17880.54	18451.94	17880.54	15702.80	39840.47	O.K.		
3	1706.451613	15	0.07877573	0.03293480	43326.65	18116.34	0.072180804	0.032032303	39699.44	17617.76655	Classe 4	39699.44	8.37	17617.77	2.75	0	15559.33362	O.K.	442.25	0.88954	O.K.	Não há redução	18116.34	17617.77	18116.34	17617.77	15559.33	39699.44	O.K.		
3,5	1690.860215	15	0.07804937	0.03233422	42927.15	17783.82	0.071919622	0.031556521	39555.79	17356.08668	Classe 4	39555.79	7.85	17356.09	2.41	0	15415.86651	O.K.	440.57	0.88895	O.K.	Não há redução	17783.82	17356.09	17783.82	17356.09	15415.87	39555.79	O.K.		
4	1675.268817	15	0.07763200	0.03173523	42527.65	17454.38	0.07163532	0.031082736	39409.44	17095.50461	Classe 4	39409.44	7.33	17095.50	2.06	0	15272.3994	O.K.	438.85	0.88836	O.K.	Não há redução	17454.38	17095.50	17454.38	17095.50	15272.40	39409.44	O.K.		
4,5	1659.677419	15	0.07659664	0.03114185	42128.15	17128.02	0.071382396	0.030610947	39260.32	16836.02065	Classe 4	39260.32	6.81	16836.02	1.70	0	15128.93228	O.K.	437.09	0.88777	O.K.	Não há redução	17128.02	16836.02	17128.02	16836.02	15128.93	39260.32	O.K.		
5	1644.086022	15	0.07580728	0.03055407	41728.65	16804.74	0.071106068	0.030081911	39108.34	16545.05091	Classe 4	39108.34	6.28	16545.05	1.55	0	14985.46517	O.K.	435.31	0.88718	O.K.	Não há redução	16804.74	16545.05	16804.74	16545.05	14985.47	39108.34	O.K.		
5,5	1628.494624	15	0.07513491	0.02997189	41329.15	16484.54	0.070824398	0.02954749	38953.42	16251.34486	Classe 4	38953.42	5.75	16251.34	1.41	0	14841.99806	O.K.	433.51	0.88658	O.K.	Não há redução	16484.54	16251.34	16484.54	16251.34	14842.00	38953.42	O.K.		
6	1612.903226	15	0.07441755	0.02939531	40929.65	16167.42	0.070537323	0.029018111	38795.48	15959.96101	Classe 4	38795.48	5.21	15959.96	1.28	0	14698.53095	O.K.	431.69	0.88597	O.K.	Não há redução	16167.42	15959.96	16167.42	15959.96	14698.53	38795.48	O.K.		
6,5	1597.311828	15	0.07369119	0.02882433	40530.15	15853.38	0.070244401	0.028492544	38634.42	15670.89936	Classe 3	40530.15	0.00	15853.38	0.00	0	14555.06384	O.K.	429.85	0.88536	O.K.	Não há redução	15853.38	15670.90	15853.38	15670.90	14555.06	40530.15	O.K.		
7	1581.72043	15	0.07296482	0.02825895	40130.65	15542.42	0.06994571	0.027972712	38470.16	15384.1899	Classe 3	40130.65	0.00	15542.42	0.00	0	14411.59673	O.K.	428.00	0.88473	O.K.	Não há redução	15542.42	15384.16	15542.42	15384.16	14411.60	40130.65	O.K.		
7,5	1565.129032	15	0.07223846	0.02761097	39731.65	15242.55	0.07223846	0.027454078	38260.16	15246.1296	Classe 3	39731.65	0.00	15246.13	0.00	0	14288.1296	O.K.	426.14	0.88410	O.K.	Não há redução	15246.13	15246.13	15246.13	15246.13	14288.13	39731.15	O.K.		
8	1550.537634	15	0.07152120	0.02714949	39331.65	14929.75	0.06933022	0.026941177	38131.62	14817.64757	Classe 3	39331.65	0.00	14929.75	0.00	0	14124.66251	O.K.	424.28	0.88346	O.K.	Não há redução	14929.75	14817.65	14929.75	14817.65	14124.66	39331.65	O.K.		
8,5	1534.946237	15	0.07078573	0.02659428	38932.15	14628.03	0.069012985	0.02643499	37957.14	14537.8747	Classe 3	38932.15	0.00	14628.03	0.00	0	13981.1954	O.K.	422.41	0.88280	O.K.	Não há redução	14628.03	14537.87	14628.03	14537.87	13981.20	38932.15	O.K.		
9	1519.354839	15	0.07005937	0.02605344	38532.65	14329.39	0.068689173	0.025928044	37779.04	14260.42402	Classe 3	38532.65	0.00	14329.39	0.00	0	13837.72829	O.K.	420.53	0.88213	O.K.	Não há redução	14329.39	14260.42	14329.39	14260.42	13837.73	38532.65	O.K.		
9,5	1503.763441	15	0.06933301	0.02551606	38133.15	14033.83	0.068359571	0.02542781	37597.22	13985.29553	Classe 3	38133.15	0.00	14033.83	0.00	0	13694.26118	O.K.	418.66	0.88145	O.K.	Não há redução	14033.83	13985.30	14033.83	13985.30	13694.26	38133.15	O.K.		
10	1488.172043	15	0.06860665	0.02498429	37733.65	13741.36	0.068020977	0.024931799	37411.54	13712.48924	Classe 3	37733.65	0.00	13741.36	0.00	0	13550.79407	O.K.	416.78	0.88076	O.K.	Não há redução	13741.36	13712.49	13741.36	13712.49	13550.79	37733.65	O.K.		
10,5	1472.580645	15	0.06788028	0.02458811	37324.16	13451.96	0.067678155	0.024440009	37221.89	13442.00514	Classe 3	37324.16	0.00	13451.96	0.00	0	13407.32696	O.K.	414.91	0.88004	O.K.	Não há redução	13451.96	13442.01	13451.96	13442.01	13407.33	37334.16	O.K.		
11	1456.989247	15	0.06715392	0.02393753	36934.66	13165.64	0.06715392	0.023937534	36934.66	13165.64354	Classe 3	36934.66	0.00	13165.64	0.00	0	13263.85985	O.K.	413.04	0.87932	O.K.	Não há redução	13165.64	13165.64	13165.64	13165.64	13263.86	36934.66	O.K.		
11,5	1441.397849	15	0.06642756	0.02342256	36535.16	12882.41	0.06642756	0.023422559	36535.16	12882.41	Classe 3	36535.16	0.00	12882.41	0.00	0	13120.39274	O.K.	411.17	0.87858	O.K.	Não há redução	12882.41	12882.41	12882.41	12882.41	13120.39	36535.16	O.K.		
12	1425.806452	15	0.06570119	0.02291318	36135.66	12602.25	0.06570119	0.022913184	36135.66	12602.25	Classe 3	36135.66	0.00	12602.25	0.00	0	12976.92563	O.K.	409.30	0.87782	O.K.	Não há redução	12602.25	12602.25	12602.25	12602.25	12976.93	36135.66	O.K.		
12,5	1410.215054	15	0.06497483	0.02240941	35736.16	12325.18	0.06497483	0.02240941	35736.16	12325.18	Classe 3	35736.16	0.00	12325.18	0.00	0	12833.45852	O.K.	407.44	0.87704	O.K.	Não há redução	12325.18	12325.18	12325.18	12325.18	12833.46	35736.16	O.K.		
13	1394.623656	15	0.06424847	0.02191124	35336.66	12051.18	0.06424847	0.021911236	35336.66	12051.18	Classe 3	35336.66	0.00	12051.18	0.00	0	12689.99141	O.K.	405.59	0.87624	O.K.	Não há redução	12051.18	12051.18	12051.18	12051.18	12689.99	35336.66	O.K.		
13,5	1379.032529	15	0.06352210	0.02141862	34937.16	11780.26	0.06352210	0.02141862	34937.16	11780.26	Classe 3	34937.16	0.00	11780.26	0.00	0	12546.5243	O.K.	403.74	0.87542	O.K.	Não há redução	11780.26	11780.26	11780.26	11780.26	12546.52	34937.16	O.K.		
14	1363.44086	15	0.06279514	0.02093169	34537.66	11512.43	0.06279514	0.02093169	34537.66	11512.43	Classe 3	34537.66	0.00	11512.43	0.00	0	12403.05719	O.K.	401.90	0.87459	O.K.	Não há redução	11512.43	11512.43	11512.43	11512.43	12403.06	34537.66	O.K.		
14,5	1347.849642	15	0.06204938	0.02045032	34138.16	11247.67	0.06204937	0.02045031	34138.16	11247.67443	Classe 3	34138.16	0.00	11247.67	0.00	0	12259.59008	O.K.	400.07	0.87373	O.K.	Não há redução	11247.67	11247.67	11247.67	11247.67	12259.59	34138.16	O.K.		
15	1332.258065	15	0.06134301	0.01997455	33738.66	10986.00	0.06134301	0.01997455	33738.66	10985.9998	Classe 3	33738.66	0.00	10986.00	0.00	0	12116.12297	O.K.	398.25	0.87284	O.K.	Não há redução	10986.00	10986.00	10986.00	10986.00	12116.12	33738.66	O.K.		
15,5	1316.66667	15	0.06061665	0.01950347	33339.16	10727.41	0.06061665	0.019503474	33339.16	10727.40554	Classe 3	33339.16	0.00	10727.41	0.00	0	11972.65586	O.K.	396.44	0.87194	O.K.	Não há redução	10727.41	10727.41	10727.41	10727.41	11972.66	33339.16	O.K.		
16	1301.075269	15	0.05989029	0.01903980	32939.66	10471.89	0.05989029	0.019039803	32939.66	10471.89148	Classe 3	32939																			

Segurança pelo Método Geral															
Altura (m):	46,5	Ø Topo (mm):	350	α ult,k,N min	47,74486349	λop	0,30465	α cr,N	14,63	α	0,49	α LT	0,49	χ op	0,95
Discretização da altura (m):	0,5	Ø Base (mm):	1800	α ult,k,M min	1,35785405			α cr,M min	7,45E+07	φ	0,57205	φ LT	0,57205	Segurança?	1,1687
Número de disc. N:	93	Geometria:	12,0	α ult,k	1,35785405			α cr,op	14,63000000	χ	0,946773	χ LT	0,946773		
Altura z (m)	α ult,k,N			α ult,k,M			α ult,k,M			α cr,M					
	Ned (kN)	Nc,rk (kN)	α ult,k,N	Med <sub>d</sub> (kN.m)	Med <sub>d</sub> (kN.m)	Mc,rk (kN.m)	α ult,k,Mx	α ult,k,My	α ult,k,M	α cr,Mx	α cr,My	α cr,M			
0	431,07	40508,63	93,97	13427,29	0,00	19210,88	1,430733612	Não Aplicável	1,430733612	74475164,55	Não Aplicável	74475164,55			
0,5	427,57	40379,71	94,44	13202,49	0,00	18942,62	1,434776233	Não Aplicável	1,434776233	75743275,36	Não Aplicável	75743275,36			
1	424,09	40248,50	94,91	12978,37	0,00	18675,46	1,438968204	Não Aplicável	1,438968204	77051294,95	Não Aplicável	77051294,95			
1,5	420,65	40114,93	95,36	12754,91	0,00	18409,39	1,443317421	Não Aplicável	1,443317421	78401154,83	Não Aplicável	78401154,83			
2	417,23	39978,94	95,82	12532,20	0,00	18144,42	1,447824226	Não Aplicável	1,447824226	79794468,60	Não Aplicável	79794468,60			
2,5	413,85	39840,47	96,27	12310,26	0,00	17880,54	1,452491144	Não Aplicável	1,452491144	81233051,52	Não Aplicável	81233051,52			
3	410,50	39699,44	96,71	12089,14	0,00	17617,77	1,457322105	Não Aplicável	1,457322105	82718890,69	Não Aplicável	82718890,69			
3,5	407,18	39555,79	97,15	11868,85	0,00	17356,09	1,46232212	Não Aplicável	1,46232212	84254137,89	Não Aplicável	84254137,89			
4	403,89	39409,44	97,58	11649,43	0,00	17095,50	1,467497121	Não Aplicável	1,467497121	85841111,70	Não Aplicável	85841111,70			
4,5	400,63	39260,32	98,00	11430,88	0,00	16836,02	1,472853885	Não Aplicável	1,472853885	87482304,50	Não Aplicável	87482304,50			
5	397,40	39108,34	98,41	11213,23	0,00	16545,05	1,475494138	Não Aplicável	1,475494138	89180392,73	Não Aplicável	89180392,73			
5,5	394,20	38953,42	98,82	10996,47	0,00	16251,34	1,477868857	Não Aplicável	1,477868857	90938249,71	Não Aplicável	90938249,71			
6	391,03	38795,48	99,21	10780,63	0,00	15959,96	1,480429398	Não Aplicável	1,480429398	92758960,79	Não Aplicável	92758960,79			
6,5	387,90	40530,15	104,49	10565,70	0,00	15853,38	1,500456679	Não Aplicável	1,500456679	94645840,66	Não Aplicável	94645840,66			
7	384,79	40130,65	104,29	10351,70	0,00	15542,42	1,501436237	Não Aplicável	1,501436237	96602453,13	Não Aplicável	96602453,13			
7,5	381,72	39731,15	104,09	10138,63	0,00	15234,55	1,502623301	Não Aplicável	1,502623301	98632633,29	Não Aplicável	98632633,29			
8	378,67	39331,65	103,87	9926,49	0,00	14929,75	1,504030362	Não Aplicável	1,504030362	100740512,52	Não Aplicável	100740512,52			
8,5	375,66	38932,15	103,64	9715,29	0,00	14628,03	1,505671031	Não Aplicável	1,505671031	102930546,55	Não Aplicável	102930546,55			
9	372,68	38532,65	103,39	9505,02	0,00	14329,39	1,507560128	Não Aplicável	1,507560128	105207546,98	Não Aplicável	105207546,98			
9,5	369,72	38133,15	103,14	9295,69	0,00	14033,83	1,509713797	Não Aplicável	1,509713797	107576716,72	Não Aplicável	107576716,72			
10	366,80	37733,65	102,87	9087,30	0,00	13741,36	1,512149629	Não Aplicável	1,512149629	110043689,87	Não Aplicável	110043689,87			
10,5	363,91	37334,16	102,59	8879,85	0,00	13451,96	1,514886798	Não Aplicável	1,514886798	112614576,72	Não Aplicável	112614576,72			
11	361,05	36934,66	102,30	8673,33	0,00	13165,64	1,517946231	Não Aplicável	1,517946231	115296014,63	Não Aplicável	115296014,63			
11,5	358,22	36535,16	101,99	8467,74	0,00	12882,41	1,521350783	Não Aplicável	1,521350783	118095225,58	Não Aplicável	118095225,58			
12	355,42	36135,66	101,67	8263,09	0,00	12602,25	1,525125456	Não Aplicável	1,525125456	121020081,57	Não Aplicável	121020081,57			
12,5	352,66	35736,16	101,33	8059,37	0,00	12325,18	1,529297627	Não Aplicável	1,529297627	124079179,02	Não Aplicável	124079179,02			
13	349,92	35336,66	100,98	7856,58	0,00	12051,18	1,533897332	Não Aplicável	1,533897332	127281923,76	Não Aplicável	127281923,76			
13,5	347,22	34937,16	100,62	7654,70	0,00	11780,26	1,538957572	Não Aplicável	1,538957572	130638628,17	Não Aplicável	130638628,17			
14	344,54	34537,66	100,24	7453,75	0,00	11512,43	1,54451468	Não Aplicável	1,54451468	134160622,87	Não Aplicável	134160622,87			
14,5	341,90	34138,16	99,85	7253,72	0,00	11247,67	1,55060873	Não Aplicável	1,55060873	137860385,26	Não Aplicável	137860385,26			
15	339,28	33738,66	99,44	7054,59	0,00	10986,00	1,557284026	Não Aplicável	1,557284026	141751688,13	Não Aplicável	141751688,13			
15,5	336,70	33339,16	99,02	6856,37	0,00	10727,41	1,564589652	Não Aplicável	1,564589652	145849772,00	Não Aplicável	145849772,00			
16	334,15	32939,66	98,58	6659,05	0,00	10471,89	1,57258013	Não Aplicável	1,57258013	150171545,74	Não Aplicável	150171545,74			
16,5	331,63	32540,16	98,12	6462,63	0,00	10219,46	1,581316174	Não Aplicável	1,581316174	154735821,12	Não Aplicável	154735821,12			
17	329,14	32140,66	97,65	6267,09	0,00	9970,10	1,590865585	Não Aplicável	1,590865585	159563588,00	Não Aplicável	159563588,00			
17,5	326,68	31741,16	97,16	6072,44	0,00	9723,83	1,601304305	Não Aplicável	1,601304305	164678338,82	Não Aplicável	164678338,82			
18	324,25	31341,66	96,66	5878,67	0,00	9480,64	1,61271766	Não Aplicável	1,61271766	170106452,79	Não Aplicável	170106452,79			
18,5	321,85	30942,16	96,14	5685,77	0,00	9240,52	1,625201847	Não Aplicável	1,625201847	175877653,28	Não Aplicável	175877653,28			
19	319,48	30542,66	95,60	5493,73	0,00	9003,49	1,638865706	Não Aplicável	1,638865706	182025554,84	Não Aplicável	182025554,84			
19,5	317,14	30143,16	95,05	5302,56	0,00	8769,54	1,653832856	Não Aplicável	1,653832856	188588321,42	Não Aplicável	188588321,42			
20	314,84	29743,66	94,47	5112,23	0,00	8538,67	1,670244283	Não Aplicável	1,670244283	195609462,78	Não Aplicável	195609462,78			
20,5	312,79	29338,99	75,26	4922,74	0,00	6684,37	1,357854049	Não Aplicável	1,357854049	203138804,39	Não Aplicável	203138804,39			
21	310,99	23219,39	74,66	4734,09	0,00	6504,11	1,373886131	Não Aplicável	1,373886131	211233676,32	Não Aplicável	211233676,32			
21,5	309,21	22899,79	74,06	4546,27	0,00	6326,31	1,391537491	Não Aplicável	1,391537491	219960381,38	Não Aplicável	219960381,38			
22	307,46	22580,19	73,44	4359,27	0,00	6150,98	1,411009883	Não Aplicável	1,411009883	229396021,79	Não Aplicável	229396021,79			
22,5	305,73	22260,59	72,81	4173,09	0,00	5978,11	1,432539354	Não Aplicável	1,432539354	239630791,26	Não Aplicável	239630791,26			
23	303,98	21940,99	72,19	4034,13	0,00	5807,71	1,439644113	Não Aplicável	1,439644113	247885103,88	Não Aplicável	247885103,88			
23,5	302,25	21621,39	71,59	3895,96	0,00	5639,77	1,447592486	Não Aplicável	1,447592486	256675885,19	Não Aplicável	256675885,19			
24	300,50	21301,79	71,00	3758,59	0,00	5474,29	1,456475711	Não Aplicável	1,456475711	266057303,27	Não Aplicável	266057303,27			
24,5	298,75	20982,20	70,41	3621,99	0,00	5311,28	1,466397822	Não Aplicável	1,466397822	276091092,37	Não Aplicável	276091092,37			
25	297,00	20662,60	69,82	3486,17	0,00	5150,74	1,477477963	Não Aplicável	1,477477963	286847921,69	Não Aplicável	286847921,69			
25,5	295,25	20343,00	69,23	3351,10	0,00	4992,65	1,489853221	Não Aplicável	1,489853221	298409072,69	Não Aplicável	298409072,69			
26	293,50	20023,40	68,64	3216,79	0,00	4837,04	1,503682119	Não Aplicável	1,503682119	310868508,76	Não Aplicável	310868508,76			
26,5	291,75	19703,80	68,05	3083,23	0,00	4683,88	1,519148968	Não Aplicável	1,519148968	324335449,12	Não Aplicável	324335449,12			
27	290,00	19384,20	67,46	2950,40	0,00	4533,19	1,536469312	Não Aplicável	1,536469312	338937595,97	Não Aplicável	338937595,97			
27,5	288,25	19064,60	66,87	2818,29	0,00	4384,97	1,555896828	Não Aplicável	1,555896828	354825217,14	Não Aplicável	354825217,14			
28	286,50	18745,00	66,28	2686,90	0,00	4239,21	1,577732128	Não Aplicável	1,577732128	372176360,84	Não Aplicável	372176360,84			
28,5	284,75	18425,40	65,69	2556,21	0,00	4095,91	1,602334134	Não Aplicável	1,602334134	391203586,61	Não Aplicável	391203586,61			